

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

VLIV VELIKOSTI RÁMCE NA DĚLICÍ POMĚR V PASIVNÍCH  
OPTICKÝCH SÍTÍCH XG-PON

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

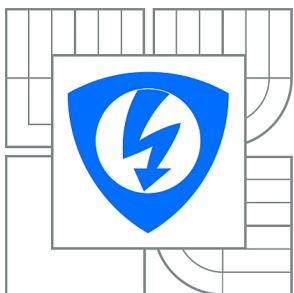
Bc. LUKÁŠ KOČÍ

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## VLIV VELIKOSTI RÁMCE NA DĚLICÍ POMĚR V PASIVNÍCH OPTICKÝCH SÍTÍCH XG-PON

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. LUKÁŠ KOČÍ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR MÜNSTER, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor  
Telekomunikační a informační technika

**Student:** Bc. Lukáš Kočí

**ID:** 134522

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2014/2015

## NÁZEV TÉMATU:

**Vliv velikosti rámce na dělicí poměr v pasivních optických sítích XG-PON**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem diplomové práce je detailní rozbor problematiky přenosu dat v pasivních optických sítích s dělicím poměrem minimálně 1:256 a přenosovou rychlostí 10 Gbit/s, definované doporučením ITU-T. Práce bude obsahovat simulace realizace spojení mezi OLT a ONU jednotkami, a vliv časování pro jednotlivé dělicí poměry. Výsledkem práce bude návrh na zlepšení vybraného parametru doporučení ITU-T.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] FILKA, M. Optoelektronika : Pro telekomunikace a informatiku. Vyd. 1. Brno : Centa, 2009. 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.

[2] CRISP, J. and BARRY, J., E, Introduction to Fiber Optics. Amsterdam: Newnes, 2005. eBook

**Termín zadání:** 9.2.2015

**Termín odevzdání:** 26.5.2015

**Vedoucí práce:** Ing. Petr Münster, Ph.D.

**Konzultanti diplomové práce:**

**doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.**

*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá teoretickou definicí pasivních optických sítí, dále popisem metod sdružování kanálů v pasivních optických sítích a problematikou koexistence případně migrace mezi standardy. Podstatou práce je standard XG-PON (10-Gigabit-capable Passive Optical Network). Tento standard je obecně definován spolu s popisem fyzické vrstvy. Podrobně je rozebrána jeho přenosová vrstva. Definovány jsou stavy, kterými prochází koncové jednotky během aktivačního procesu. Dále se diplomová práce zabývá procesem připojování koncových jednotek do pasivní optické sítě a časováním mezi centrální jednotkou a koncovými jednotkami. Simulačními modely je potvrzena vzrůstající čekací doba na připojení při zvyšování počtu připojujících se koncových jednotek. Rovněž je zkoumán vznik a řešení kolizních stavů společně s vyrovnáváním zpoždění během komunikace. V poslední části se diplomová práce zabývá vlivem indexu lomu na časování.

## KLÍČOVÁ SLOVA

XG-PON, XGTC, XGEM, PHY, pasivní optická síť, dělicí poměr, adaptační podvrstva, rámcová podvrstva, fyzická adaptační podvrstva

## ABSTRACT

The diploma thesis deals with the theoretical definition of passive optical networks, furthermore the description of methods of channel bundling in passive optical networks and the coexistence and migration between standards. The main essence of this work is the XG-PON (10-Gigabit-capable Passive Optical Network) standard. This standard is generally defined along with a description of the physical layer. The transport layer is detailed analysis. There is a description of conditions, under which the Optical Network Unit pass through, when is activated. Additionally, this diploma thesis focuses on the processes of connecting Optical Network Units to the Passive Optical Networks and the timing relationships between Optical Network Units and Optical Line Terminal. The simulations demonstrate that as the number of simultaneous connections to Optical Network Unit increase, longer wait time for each additional connection becomes. This also solves the collision conditions, that might arise in communication and the equalization delay. Finally, the diploma thesis deals with the influence of a refractive index on timing relationships.

## KEYWORDS

XG-PON, XGTC, XGEM, PHY, passive optical network, split ratio, service adaptation sublayer, framing sublayer, physical adaptation sublayer

KOČÍ, Lukáš *Vliv velikosti rámce na dělicí poměr v pasivních optických sítích XG-PON*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2014. 89 s. Vedoucí práce byl Ing. Petr Münster, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Vliv velikosti rámce na dělicí poměr v pasivních optických sítích XG-PON“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom 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)

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce, panu Ing. Petru Münsterovi, Ph.D. a panu Ing. Tomáši Horváthovi za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy vedoucí k dokončení diplomové práce. Chtěl bych také poděkovat za vedení a pomoc při tvorbě publikací vznikajících paralelně s diplomovou prací. Dále bych chtěl poděkovat rodině a svým blízkým za obrovskou podporu, motivaci při psaní diplomové práce a při studiu.

Brno .....

.....

(podpis autora)



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 diplomové 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)



EVROPSKÁ UNIE  
EVROPSKÝ FOND PRO REGIONÁLNÍ ROZVOJ  
INVESTICE DO VAŠÍ BUDOUCNOSTI



# OBSAH

Úvod	12
<b>1 Optická přístupová síť</b>	<b>13</b>
1.1 FTTx	13
1.1.1 Architektura optické přístupové sítě	14
1.2 Aktivní optické sítě	15
1.3 Pasivní optické sítě	15
<b>2 Sdružování kanálů v PON</b>	<b>18</b>
2.1 Časové dělení	18
2.1.1 Časový přístup k médiu TDMA	18
2.1.2 Dynamické přidělování kanálů	18
2.1.3 Časový multiplex (TDM-PON)	19
2.2 Vlnové dělení	20
2.2.1 Vlnové dělení s pevně přiřazenými vlnovými délkami	21
2.2.2 Vlnové dělení s využitím směrové odbočnice AWG	22
2.2.3 Vlnové dělení s využitím pasivního rozbočovače a směrové odbočnice AWG	22
2.2.4 UDWDM-PON	23
2.3 OFDM-PON	23
2.4 TWDM-PON	24
<b>3 Koexistence a migrace</b>	<b>26</b>
3.1 Přejít mezi standardy	27
3.1.1 Zelené pole	27
3.1.2 Hnědé pole	27
<b>4 XG-PON</b>	<b>29</b>
4.1 Fyzická vrstva	29
4.1.1 Dělicí poměr	30
<b>5 Přenosová vrstva XG-PON</b>	<b>32</b>
5.1 XGTC adaptační podvrstva	34
5.1.1 SDU fragmentování	34
5.1.2 XGEM rámec	36
5.1.3 Užitečná data XGTC rámce	38
5.2 XGTC rámcová podvrstva	39
5.2.1 XGTC rámec pro sestupný směr	39

5.2.2	XGTC burst pro vzestupný směr . . . . .	42
5.3	PHY adaptační podvrstva . . . . .	44
5.3.1	PHY rámeček pro sestupný směr . . . . .	45
5.3.2	PHY rámeček a PHY burst pro vzestupný směr . . . . .	46
5.4	Stavy jednotek ONU . . . . .	48
5.5	Časování mezi OLT a ONU . . . . .	54
5.5.1	Časování při průchodu stavem O2-3 . . . . .	55
5.5.2	Časování při průchodu stavem O4 . . . . .	56
5.6	FEC v XG-PON . . . . .	58
5.6.1	FEC v sestupném směru . . . . .	59
5.6.2	FEC ve vzestupném směru . . . . .	60
5.7	HEC v XG-PON . . . . .	62
<b>6</b>	<b>Realizace v Matlabu</b>	<b>63</b>
6.1	Zapouzdření SDU v XG-PON . . . . .	63
6.2	Vliv FEC na dostupnou šířku pásma . . . . .	65
6.3	Simulace časování mezi OLT a ONU . . . . .	67
6.3.1	Připojování ONU do PON . . . . .	68
6.3.2	Vznik kolizních stavů . . . . .	72
6.3.3	Vyrovnávání časování u ONU . . . . .	74
6.3.4	Vliv indexu lomu na časování v XG-PON . . . . .	75
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>76</b>
	<b>Literatura</b>	<b>78</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>81</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>85</b>
<b>A</b>	<b>Příloha A</b>	<b>86</b>
A.1	Ukázky zdrojových kódů . . . . .	86
A.1.1	Zapouzdření SDU v XG-PON . . . . .	86
A.1.2	Vliv FEC na dostupnou šířku pásma . . . . .	87
<b>B</b>	<b>Příloha B</b>	<b>89</b>
B.1	Obsah přiloženého CD . . . . .	89

# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Základní blokové schéma PON [21]. . . . .	15
1.2	Vývoj PON – navyšování přenosových kapacit [1, 13]. . . . .	17
2.1	Princip časového multiplexu TDM pro sestupný směr. . . . .	19
2.2	Princip časového multiplexu TDM pro vzestupný směr. . . . .	20
2.3	WDM-PON s pevně přiřazenými individuálními vlnovými délkami. . . . .	21
2.4	WDM-PON s využitím směrové odbočnice typu AWG. . . . .	22
2.5	Kaskádní zapojení AWG odbočnic a pasivních rozbočovačů. . . . .	23
2.6	Princip TWDM-PON. . . . .	24
3.1	Přiřazení pásem vlnových délek pro jednotlivé standardy [10, 14, 15, 17]. . . . .	26
3.2	Blokové schéma koexistence GPON, XG-PON a NG-PON2 [6]. . . . .	26
4.1	XG-PON vytváření dělicího poměru [10]. . . . .	31
5.1	Struktura rámců XG-PON pro sestupný směr [11]. . . . .	33
5.2	Struktura rámců XG-PON pro vzestupný směr [11]. . . . .	33
5.3	Fragmentování SDU jednotek [11]. . . . .	34
5.4	Struktura XGEM rámce [11]. . . . .	36
5.5	Velikost XGEM užitečných dat [11]. . . . .	38
5.6	Struktura XGTC užitečné datové části [11]. . . . .	39
5.7	Struktura XGTC rámce. . . . .	39
5.8	Struktura BWmap [11]. . . . .	40
5.9	Definování StartTime a GrantSize parametrů [11]. . . . .	41
5.10	Struktura PLOAMd. . . . .	42
5.11	XGTC burst a rozložení režijního pole [11]. . . . .	43
5.12	Struktura PHY rámce XG-PON [11]. . . . .	45
5.13	Struktura PSBd [11]. . . . .	45
5.14	PHY rámec a PHY burst pro vzestupný směr [11]. . . . .	47
5.15	PSBu pro vzestupný směr. . . . .	48
5.16	ONU synchronizační automat. . . . .	49
5.17	Stavový diagram ONU jednotky. . . . .	51
5.18	Výpočet vyrovnávacího zpoždění. . . . .	57
5.19	Vkládání FEC parity a tvorba PHY rámce pro sestupný směr [11]. . . . .	59
5.20	Vkládání FEC parity a tvorba PHY burst pro vzestupný směr [11]. . . . .	61
5.21	HEC struktura používaná XG-PON [11]. . . . .	62
6.1	Závislost účinnosti XGEM zapouzdření na velikosti SDU. . . . .	63
6.2	Vývojový diagram pro výpočet účinnosti zapouzdření SDU rozdílných velikostí. . . . .	64
6.3	Vývojový diagram pro výpočet dostupné šířky pásma v závislosti na použití FEC. . . . .	65

6.4	Porovnání dostupné šířky pásma u sestupného a vzestupného směru při zapnutém a vypnutém FEC. . . . .	66
6.5	Závislost dostupné šířky pásma na počtu ONU jednotek při zapnutém a vypnutém FEC. . . . .	67
6.6	Topologie XG-PON sestavená v prostředí Matlab [16]. . . . .	68
6.7	Aktivační proces dvou ONU připojujících se do PON. . . . .	69
6.8	Časový diagram připojení ONU jednotky do PON [16]. . . . .	69
6.9	Vývojový diagram pro výpočet dílčí a celkové doby připojení jednotlivých ONU. . . . .	70
6.10	Doby připojení jednotlivých ONU během jednoho registračního cyklu. . . . .	71
6.11	Potřebný čas pro připojení 256 ONU jednotek do PON. . . . .	72
6.12	Přidávání náhodného zpoždění registrujícím se ONU. . . . .	72
6.13	Druhý případ vzniku kolize. . . . .	73
6.14	Výpočet EqD pro PON obsahující 256 ONU. . . . .	74
6.15	Závislost doby šíření optického signálu RTD na rozdílném indexu lomu. . . . .	75

# SEZNAM TABULEK

1.1	Porovnání vybraných standardů ITU-T a IEEE [1]. . . . .	16
4.1	Přehled parametrů fyzické vrstvy XG-PON [10]. . . . .	30
4.2	Útlumové třídy XG-PON [10]. . . . .	30
5.1	Rozsah hodnot ALLOC_ID. . . . .	35
5.2	Rozsah hodnot ONU_ID. . . . .	36
5.3	Rozsah hodnot pro XGEM PORT_ID [11]. . . . .	37
5.4	Výpočet délky P dle L [11]. . . . .	37
5.5	Výpočet BufOcc W dle L. . . . .	44
5.6	Doporučené hodnoty preamble a vymezení [11]. . . . .	61
6.1	Vliv FEC na dostupnou šířku pásma. . . . .	66

# ÚVOD

Pasivní optické sítě zažívají v posledních letech velký rozvoj a jejich vývoji je věnována velká pozornost. Mezi hlavní důvody vzniku nových standardů patří navyšování přenosových kapacit, navyšování přenosových vzdáleností v únosné míře vzhledem k použití pasivních prvků a v neposlední řadě také navyšování koncových jednotek v podobě navyšování dělicího poměru.

V první kapitole je popsána optická přístupová síť zahrnující zejména spojení centrální jednotky a více koncových jednotek, kterou lze rozdělit na aktivní a pasivní optické sítě, případně za optické přístupové sítě obecně považovat technologii vedení optického vlákna do blízkosti uživatele. Obecně je také popsána architektura optických přístupových sítí. Stěžejní část tvoří pasivní optické sítě, u kterých je popsán stručný přehled od minulosti po současnost.

S problematikou optických přístupových sítí je spjato sdružování komunikačních kanálů, kterým se zabývá následující kapitola. Popsány jsou nejznámější metody vlnového slučování, případně časového slučování, jejich kombinace vyskytující se v pasivních optických sítích nové generace, ale také zvažované a specifické techniky, mezi které patří například modulační metoda nebo velmi jemné vlnové dělení.

Následující kapitola pojednává o problematice koexistence a migrace jednotlivých standardů. Oba tyto postupy jsou velmi důležité z pohledu nasazení více standardů v jedné pasivní optické síti, případně pokud je žádoucí pasivní optickou síť revitalizovat a nasadit pouze novější druh standardu.

Hlavní náplní práce je standard XG-PON, pracující s šířkou pásma 10 Gbit/s v sestupném směru a 2,5 Gbit/s ve vzestupném směru. V úvodu kapitoly je tento standard obecně popsán a následně jsou definovány vlastnosti fyzické vrstvy. Velká pozornost je věnována přenosové vrstvě složené ze tří dílčích oblastí, u kterých jsou konkretizovány velikosti rámců, způsoby zapouzdření a optimalizace pro přenos v sestupném i vzestupném směru. Nedílnou součástí je popis stavů, kterých nabývají koncové jednotky v příslušné pasivní optické síti. Jejich komunikace a synchronizace s centrální jednotkou je velmi klíčová z hlediska časování mezi jednotkami. Během zapouzdření jednotlivých rámců je využito metod zabezpečení datových bloků pomocí metodik popsaných v samostatných kapitolách.

Praktická část je tvořena ze tří částí. V první části, je pomocí simulace nalezeno optimální zapouzdření datových bloků v XG-PON. Dále je zkoumán vliv dopředného zabezpečení dat na dostupnou šířku přenosového pásma. V poslední části je do simulačního programu Matlab implementována topologie XG-PON, obsahující až 256 koncových jednotek. Pomocí sestavené topologie je realizováno připojování koncových jednotek do XG-PON, nalezení a ověření kolizních stavů, vyrovnání zpoždění koncových jednotek a úpravy indexu lomu pro zlepšení parametrů časování.

# 1 OPTICKÁ PŘÍSTUPOVÁ SÍŤ

Sítě vybudované pomocí optických vedení již celou řadu let zažívají velký nárůst. Jedná se o technologii, jejíž potenciál zdaleka není vyčerpán. Jde zejména o využití velkých přenosových kapacit, zajištění vysoké bezpečnosti díky složitosti odposlechu a odolnosti proti vnějšímu rušení.

Přístupové sítě využívající optická vlákna jako přenosové médium OAN (Optical Access Network), se obecně dají rozdělit z pohledu technik propojení koncových bodů do dvou kategorií. Na P2P (Point to Point), kdy je každé optické vlákno vedeno z distribučního centra ke koncovému uživateli. Toto řešení disponuje velkou přenosovou kapacitou, použitím privátního přenosového média a velmi vysokou pořizovací cenou. Druhou kategorií je P2MP (Point to Multipoint), kdy si koncový uživatelé vzájemně dělí přenosovou kapacitu nabízenou distribučním centrem.

Do P2MP sítí spadají aktivní optické sítě AON (Active Optical Network) a pasivní optické sítě PON (Passive Optical Network) [4].

## 1.1 FTTx

V souvislosti s problematikou optických sítí vzniklo zakončení optických vláken FTTx (Fiber To The x). Jedná se o síťové řešení využívající optické vlákno, které nahrazuje původní metalické vedení v částech sítě blíže koncovému uživateli. Tento pojem byl zaveden spolu s aktivními a pasivními optickými sítěmi. Jedná se o terminologii, určující vedení optického vedení do jisté úrovně sítě, dle bližšího označení. Právě poslední písmeno v označení FTTx určuje místo ukončení optické trasy a následné pokračování jinou technologií (např. metalické vedení) [21].

Nejznámější FTTx sítě jsou:

- **FTTN** (Fiber To The Node), optická vlákna jsou přivedena do distribučních uzlů ve vzdálenosti až jednotek kilometrů od koncových uživatelů, ke kterým jsou dále rozváděna metalickým vedením. Pomocí FTTN lze připojit až stovky koncových uživatelů [9],
- **FTTC** (Fiber To The Curb), optická vlákna jsou přivedena k účastnickému rozvaděči, ke kterému se koncoví účastníci připojují metalickým vedením [22],
- **FTTB** (Fiber To The Building), optická vlákna jsou přivedena do vnitřní sítě budovy. Na tuto vnitřní síť se poté napojují jednotliví účastníci [22],
- **FTTH** (Fiber To The Home), optická vlákna jsou přivedena do účastnických zásuvek [22],
- **FTTO** (Fiber To The Office), optická vlákna jsou přivedena do uživatelských rozhraní [22],

- **FTTCab** (Fiber To The Cabinet), optická vlákna jsou přivedena do rozvodných skříní s vyšším počtem připojujících se účastníků [22],
- **FTTCell** (Fiber To The Cell), optická vlákna jsou přivedena do buňky nabízející bezdrátové připojení koncových účastníků. Tato technologie, může nést označení FTTA (Fiber To The Antenna) [9].

### 1.1.1 Architektura optické přístupové sítě

Optické přístupové sítě sestávají z několika funkčních bloků: OLT (Optical Line Terminal), ONU (Optical Network Unit) případně ONT (Optical Network Terminal) a ODN (Optical Distribution Network) [25].

#### Optické linkové zakončení OLT

Jedná se o síťové rozhraní mezi přístupovou optickou sítí a páteřní sítí. OLT jednotka provádí správu, řízení a dohled nad koncovými jednotkami. Dále, dle potřeby konverzi mezi komunikačními protokoly páteřní a přístupové sítě a případně i konverzi mezi optickým a elektrickým signálem, pokud by nastala varianta, že páteřní síť je sestavena z metalického vedení [21].

#### Optická síťová jednotka ONU

ONU plní funkci optimalizace přichozího optického signálu z distribuční sítě na signál kompatibilní s účastnickými vedeními, tedy například převod na elektrický signál (strukturovaná kabeláž) nebo převod na radiový signál (bezdrátové připojení).

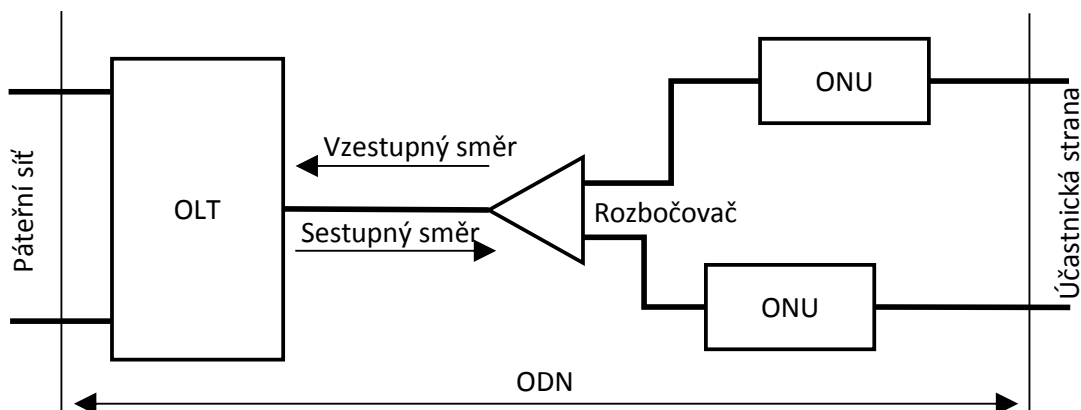
Lze se také setkat s optickým síťovým zakončením (ONT) plnícím podobnou funkci jako optická síťová jednotka, s tím rozdílem že všechny ONT v PON jsou stejné pro každého koncového uživatele. Případně navázáním jednotlivých síťových zakončení (NT), k ONU obsluhujícím více koncových uživatelů [21].

#### Optická distribuční síť ODN

Jedná se o optické pasivní prvky nacházející se mezi jednotkami OLT a ONU. Do této kategorie spadají optická vlákna, pasivní optické rozbočovače, směrové odbočnice, konektory, filtry, zesilovače a další dílčí prvky. V této síťové oblasti se počítá s útlumovými bilancemi přenosové trasy [21].

#### Schéma optické přístupové sítě

Princip optické přístupové sítě, zahrnující dílčí prvky popsané výše, lze vyjádřit schématicky. Pro tyto účely byla zvolena základní PON architektura znázorněná na obr. 1.1.



Obr. 1.1: Základní blokové schéma PON [21].

Jedná se o primitivní komunikační model složený z optického linkového zakončení na straně pátevní sítě a optického rozbočovače vymezujícího trasy směrem k účastnické straně (dělicí poměr 1:2). Tyto trasy jsou zakončeny optickou síťovou jednotkou ONU, v druhém případě pak optickým síťovým zakončením ONT.

V případě komunikace vzestupným směrem z pohledu účastnické strany plní rozbočovač funkci sjednocení komunikačních kanálů do jednoho optického vlákna vedoucího směrem k OLT.

## 1.2 Aktivní optické sítě

Aktivní optické sítě spadají do kategorie P2MP, případně P2P a v jejich vnitřní struktuře se nachází alespoň jeden prvek vyžadující ke svému chodu napájení.

Největší výhodou realizace aktivních sítí AON, v porovnání s pasivními sítěmi PON, je možnost zajištění podstatně větších dosahů (vzdálenost mezi OLT a ONU). Nevýhodou je nutnost zajištění napájení pro všechny aktivní síťové prvky. To vede k navyšování nákladů na realizaci, provoz a údržbu [21].

Problematika AON je nad rámec této práce. Z toho důvodu jí nebude dále věnována pozornost. Srovnání mezi aktivními a pasivními sítěmi lze najít v literatuře [19].

## 1.3 Pasivní optické sítě

Jak již název pasivní optická síť napovídá, je zde snahou nasazovat pouze pasivní prvky. Tedy optické prvky které nevyžadují pro svůj chod elektrickou energii. Ovšem tato myšlenka je reálná pouze v oblasti přenosové cesty, nikoli na hranicích sítě

(hlavní a koncové jednotky). Z hlediska nákladů na provoz, případně její údržbu, je tato myšlenka ideální. Nevýhodou je klesající výkon optického signálu s narůstající délkou přenosové cesty a také z důvodu průchodu pasivními prvky. Tím může být například optický rozbočovač, který snižuje výkon optického signálu o přibližně 3 dB při každém navýšení dělení. [21].

PON vyžadují v posledních letech velkou pozornost a je na ně kladen stále větší důraz. Tento fakt je způsoben budováním nových optických linek blíže koncovým účastníkům, tedy technologií FTTx a rostoucími nároky na kvalitu a rychlost přípojek.

Vzhledem ke stále rostoucím požadavkům o navyšování přenosového pásma, vychází stále nová doporučení (případně standardy), vydávané organizacemi ITU-T (International Telecommunication Union) dominující v Evropě, případně IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) dominující v Asijských zemích. Popis vlastností vybraných standardů zobrazuje tab. 1.1.

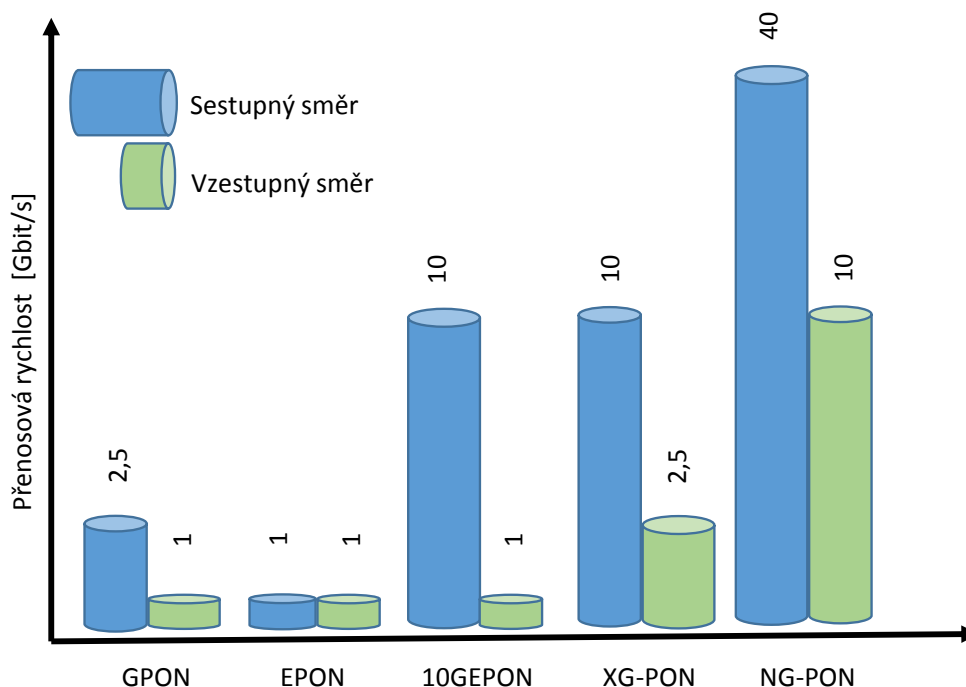
Tab. 1.1: Porovnání vybraných standardů ITU-T a IEEE [1].

	<b>GPON</b>	<b>10GEPON</b>	<b>XG-PON</b>
<b>Standard</b>	ITU-T G.984	IEEE 802.3av	ITU-T G.897
<b>Rok</b>	2003	2009	2010
<b>Přenosová rychlost na fyzické vrstvě [Gbit/s]</b>	2,4/1,2	10,31/1,25	9,9/2,5
<b>Symetrická varianta přenosové rychlosti [Gbit/s]</b>	1,25/1,25	10/10	10/10
<b>Nesymetrická varianta přenosové rychlosti [Gbit/s]</b>	2,5/1,25	10/1	10/2,5
<b>Dělicí poměr</b>	1:64 (perspektivně 1:128)	1:64 (perspektivně 1:128)	1:256
<b>Dosah [km]</b>	≤ 20	≤ 10, ≤ 20	≤ 20 (≤ 40)
<b>Vlnové délky pro sestupný směr [nm]</b>	1480–1500	1575–1580	1575–1580
<b>Vlnové délky pro vzestupný směr [nm]</b>	1260–1360 1290–1330	1260–1280 1260–1360	1260–1360

Prvotní myšlenka pasivních optických sítí vznikla před rokem 2000. Na základě prvotní myšlenky využití optických přístupových sítí vznikl první standard APON (Asynchronous Transfer Mode PON). Vyšla jej organizace ITU-T roku 1998 pod specifikací G.983. Využívá se přenosu pomocí ATM (Asynchronous Transfer Mode) buněk. V navazujícím standardu BPON (Broadband PON) z roku 2001, které bylo ustanoveno pod označením G.983, se jednalo se o rozšíření prvotního standardu.

V roce 2003 následoval standard GPON (Gigabit PON), dle ITU-T G.984, a následně zavedení protokolu Ethernet do PON pod označením standardu EPON (Ethernet PON), dle IEEE 802.3ah roku 2004. V tomto období docházelo k rozvoji multimediálních služeb, vznikaly nové techniky distribuce televizního vysílání (video v HD rozlišení) a dalo se s velkou pravděpodobností předpokládat, že i tyto standardy budou díky kladení důrazu na propustnost přístupových sítí brzy nedostatečné. Reakcí na tuto problematiku bylo roku 2009 vydání 10GEAPON, tedy 10 Gigabit EPON ve standardu IEEE 802.3av. Následně organizací ITU-T roku 2010 vydaný standard XG-PON, splňující zpětnou kompatibilitu s již existujícím GPON pro koexistenci v jedné síti, stejně jako druhá etapa projektu NG-PON (Next Generation PON) pod označením NG-PON2. Srovnání přenosových kapacit jednotlivých standardů je uvedeno na obr. 1.2.

Právě myšlenka koexistence, se stala významnou a umožňuje v současnosti nasazení GPON, XG-PON a NG-PON2 v jednom systému [6].



Obr. 1.2: Vývoj PON – navyšování přenosových kapacit [1, 13].

## 2 SDRUŽOVÁNÍ KANÁLŮ V PON

Při komunikaci mezi OLT a jednotlivými ONU jsou využívány oba směry, vzestupný „upstream“ a sestupný „downstream“. Tato komunikace může být řešena individuálně, tedy pro každý směr vést optické vlákno, případně využít vlnové dělení WDD (Wavelength Division Duplex) pro současný obousměrný provoz po jednom spoji.

Pro docílení schopnosti přenést v ODN jednotlivé komunikační kanály od ONU (ONT) směrem k OLT (a naopak) se využívá časového a vlnového dělení. U pasivních optických sítí se lze setkat s technologiemi WDM-PON (Wavelength Division Multiplexing PON) a TDM-PON (Time Division Multiplexing PON). V pasivních optických sítích nové generace NG-PON2 je zvažována technologie TWDM-PON (Time and Wavelength Division Multiplexing PON) [13]. V budoucnu se předpokládá nasazení některé z technologií DWDM-PON (Dense Wavelength Division Multiplexing PON) [24], UDWDM-PON (Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing PON) případně OFDM-PON (Orthogonal Frequency Division Multiplexing PON) [1].

### 2.1 Časové dělení

V tomto systému je současně pro všechny účastníky stanovena stejná vlnová délka. Rozbočovač duplikuje příchozí signál do všech výstupních větví v sestupném směru. V případě vzestupného směru, jde o sloučení jednotlivých kanálů, respektive rámců do jednoho multirámce vedeného k OLT jednotce. Existuje více variant sestavení časového dělení v pasivních optických sítích, kterými lze zabránit tvorbě kolizí [1].

#### 2.1.1 Časový přístup k médiu TDMA

Na první pohled nejjednodušší je využití časového přístupu k médiu TDMA (Time-Division Multiple Access). Toto řešení by bylo velice efektivní za předpokladu synchronní komunikace všech ONU jednotek, kterým lze fixně přidělit poměrnou část komunikačního kanálu. Se vzrůstajícím počtem neaktivních uživatelů by tato efektivita klesala, neboť by byl stále méně využit potenciál ODN. Kvůli fixnímu přidělení časových oken není možné dle potřeby navyšovat šířku pásma pro jednotlivé ONU [1].

#### 2.1.2 Dynamické přidělování kanálů

Problematiku dynamického přidělování pomáhá řešit algoritmus DBA (Dynamic Bandwidth Allocation). Prázdná časová okna jsou dynamicky přidělována aktivním účastníkům pasivní optické sítě. Přidělování je závislé na specifických faktorech,

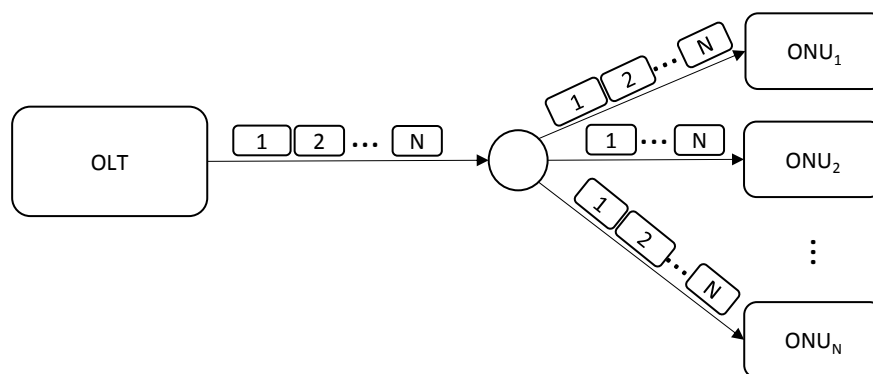
kterými mohou být priority jednotlivých ONU, šířky pásma a zajištění individuální kvality služeb. Lze tak dosáhnout vyšší efektivity a využití pasivní optické sítě [1].

### 2.1.3 Časový multiplex (TDM-PON)

Třetím případem časového dělení je TDM (Time-Division Multiplexing). Multiplexovaný, neboli sloučený multirámec, je přenášený ke všem ONU jednotkám v sestupném směru. Obsahuje tak větší množství informací a je nezbytné opatřit jednotlivé rámce jedinečnými identifikátory<sup>1</sup>. Dle těchto identifikátorů v hlavičkách rámců, je specifikováno pro jakou ONU je daný rámec přenášen. Rámec s odpovídajícím identifikátorem je v ONU zpracován, ostatní jsou zahozeny. Nezbytné by mělo být nasazení šifrování<sup>2</sup> pro jednotlivé kanály, díky kterému bude ONU jednotka zpracovávat pouze rámce pro ni určené a zamezí se cílenému zachytávání a zneužití ostatních narušitelů. Multirámec navíc obsahuje informace, které zajišťují synchronizaci jednotlivých ONU.

Ve vzestupném směru je důležitá synchronizace pro zabránění překrytí rámců při skládání do multirámcu v rozbočovači. Pro ještě efektivnější zabránění překrytí, se mezi jednotlivé rámce vkládá prázdný (krátký) časový interval pro zamezení výskytu kolizí. Vlivem různých vzdáleností jednotlivých ONU jednotek od rozbočovače, je nutné na počátku komunikace OLT a ONU navázat spojení spolu s korekcí přidělených vysílacích časových poloh ve vzestupném směru. Následně dojde k nastavení vysílací úrovně pro obě komunikující strany a může dojít k samotnému přenosu užitečných datových jednotek [1].

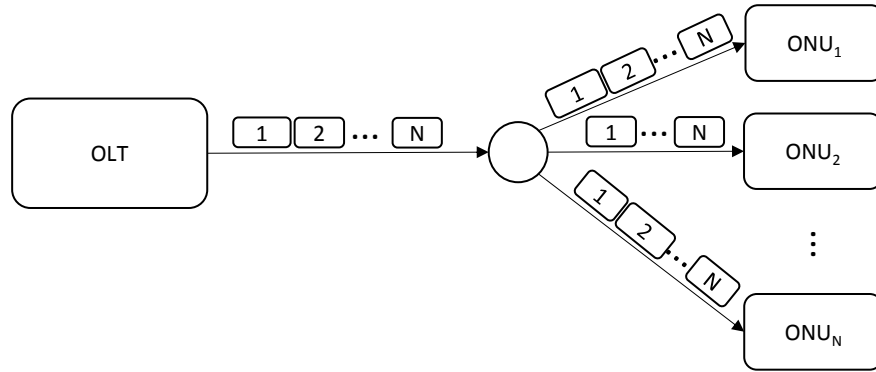
Princip časového multiplexu pro přenos sestupným směrem je znázorněn na obr. 2.1, přenos vzestupným směrem je znázorněn na obr. 2.2.



Obr. 2.1: Princip časového multiplexu TDM pro sestupný směr.

<sup>1</sup>Význam identifikátorů bude vysvětlen později.

<sup>2</sup>Šifrování je volitelnou položkou.



Obr. 2.2: Princip časového multiplexu TDM pro vzestupný směr.

## 2.2 Vlnové dělení

Principem vlnového dělení je přenášení několika vlnových délek, které jsou od sebe vzájemně odděleny dle standardu. Vzhledem k rozvoji WDM nejen v pasivních optických sítích bylo nutné definovat vlnové délky a jejich vzájemné odstupy. Vznikla tak standardizace ITU-T G.694.1, která definuje variantu hustého dělení DWDM a ITU-T G.694.2, která definuje variantu hrubého dělení CWDM (Coarse WDM).

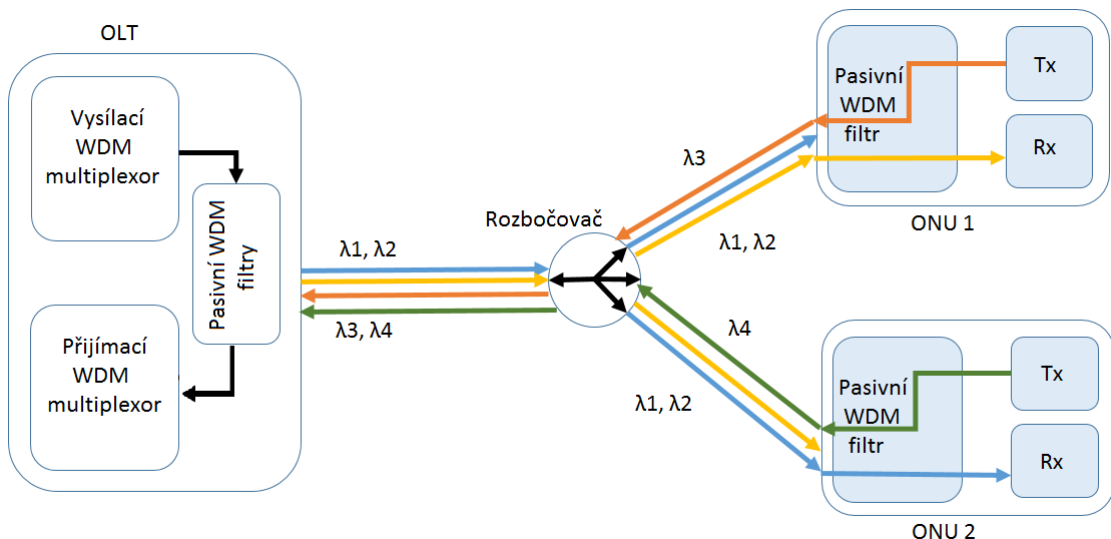
Hrubý vlnový multiplex CWDM definuje používané vlnové délky od 1271 nm do 1611 nm. Jednotlivé vlnové délky mají mezi sebou pevně určený rozestup 20 nm.

Hustý vlnový multiplex DWDM se liší od CWDM hlavně v počtu slučovaných kanálů, případně schopností přenášet data mnohem vyšší rychlostí. Takovýto systém vycházející ze základních myšlenek WDM, je ale velice konstrukčně náročný vzhledem k nutnosti vysoké spolehlivosti a přesnosti. Při sestavování systému si lze vybrat mezi fixně zadanými centrálními frekvencemi (jim přiřazenými vlnovými délkami), nebo také zvolit flexibilní metodu. Je zde možnost kombinace různě velkých frekvenčních roztečí. To umožňuje slučovat smíšené přenosové rychlosti nebo smíšené modulace. Nutné je ale zabránit překrývání jednotlivých frekvenčních roztečí. Došlo by totiž k překrytí jednotlivých slučovaných kanálů a vzniku chyb v přenosu. Referenční frekvence systému je stanovena na 193,10 THz, tedy 1552,52 nm vlnové délky. Pomocí zadaného vzorce 2.1 pak mohou být vypočítány jednotlivé frekvence kanálů  $f_k$ , kde 193,1 je konstantní referenční hodnota frekvence podle normy ITU G.694.1,  $n$  je celé reálné číslo včetně 0 a  $k$  je hodnota námi zvolené rozteče převedené na jednotku THz [18].

$$f_k = 193,1 + (n \times k) \quad (2.1)$$

### 2.2.1 Vlnové dělení s pevně přiřazenými vlnovými délkami

První varianta WDM-PON, zobrazená na obr.2.3, pracuje s pevně individuálně přidělenými vlnovými délkami všem koncovým jednotkám ONU. Je-li do pasivní optické sítě připojeno ve vzestupném směru osm koncových jednotek, jsou jim přiřazeny vlnové délky  $\lambda_1$  až  $\lambda_8$ . Pasivní rozbočovač provede pouze rozdělení optického signálu ke všem ONU jednotkám, které tedy obdrží kompletní komunikaci z ODN. Je tedy nutné nasazení vlnových filtrů v každé ONU. Jelikož jde o bezpečnostní riziko, mohlo by dojít k narušení a odposlechnutí komunikace, která nenáleží dané ONU, je tak opět nutné nasazení šifrování jednotlivých komunikací. Ve vzestupném směru bude mít každá koncová jednotka přidělenou svou individuální vysílací vlnovou délku v rozsahu  $\lambda_9$  až  $\lambda_{16}$ . Z principu komunikace mezi ONU a OLT po individuálních vlnových délkách, jde o architekturu typu P2P.



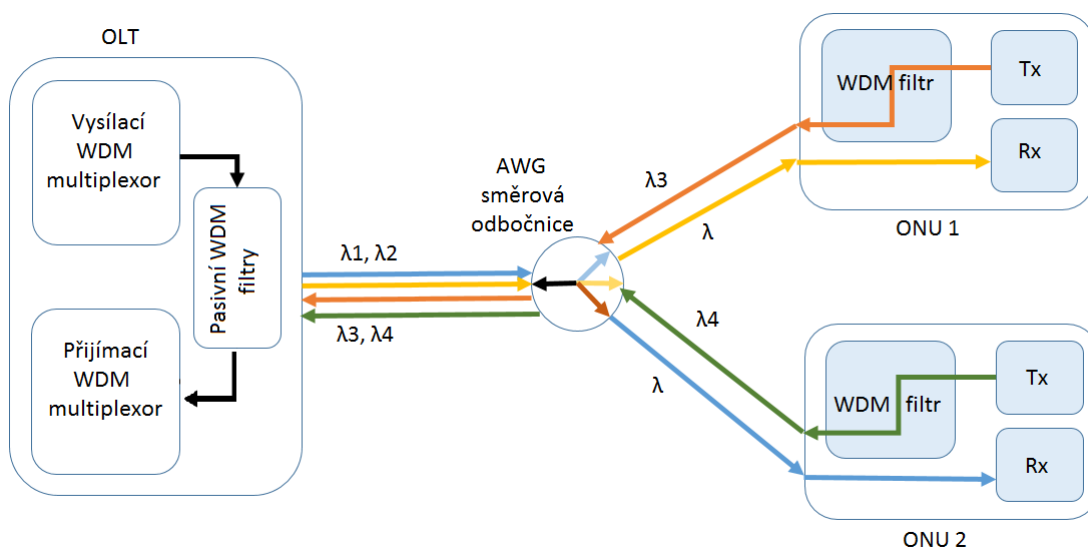
Obr. 2.3: WDM-PON s pevně přiřazenými individuálními vlnovými délkami.

Nevýhodou je nutnost nasazení šifrování pro zabránění odposlechu. Výhodou je použití pasivního rozbočovače, který je levný a poměrně jednoduchý. Se vzrůstajícím dělicím poměrem ovšem vzrůstá vložený útlum rozbočovače. Je to výrazně omezující faktor pro připojení velkého množství ONU. Z principu striktně definovaných vlnových délek vyplývá, že v dané hierarchii nelze použít komunikaci na stejné vlnové délce. Dochází tak k neefektivnímu rozložení v případně neaktivních koncových uživatelů, tedy nemožnosti navýšení šířky pásma u aktivní komunikace [18].

### 2.2.2 Vlnové dělení s využitím směrové odbočnice AWG

Druhá možnost je využití směrových odbočnic na principu vydělování vlnových délek AWG (Arrayed Waveguide Grating), zobrazená na obr. 2.4. Komunikace sestupného směru od OLT je zpracována ve směrové odbočnici, dojde k vydělení jednotlivých vlnových délek a k ONT směřují pouze vlnové délky jí příslušné. Ve vzestupném směru zůstává princip stejný jako v prvním případě pro příkladný rozsah osmi koncových jednotek na vlnových délkách  $\lambda_9$  až  $\lambda_{16}$ .

Velkou výhodou proti nasazování optických rozbočovačů je u směrové odbočnice výrazně menší vložený útlum. Hodnota útlumu se pohybuje kolem 5 dB nezávisle na počtu směrů a použitých vlnových délkách. Vydělení jednotlivých vlnových délek umožňuje na straně koncových uživatelů odstranění pasivních WDM filtrů, což opět sníží celkový útlum. Tímto způsobem lze docílit možnosti připojení vyššího počtu koncových jednotek (vyšší dělicí poměr) [18].



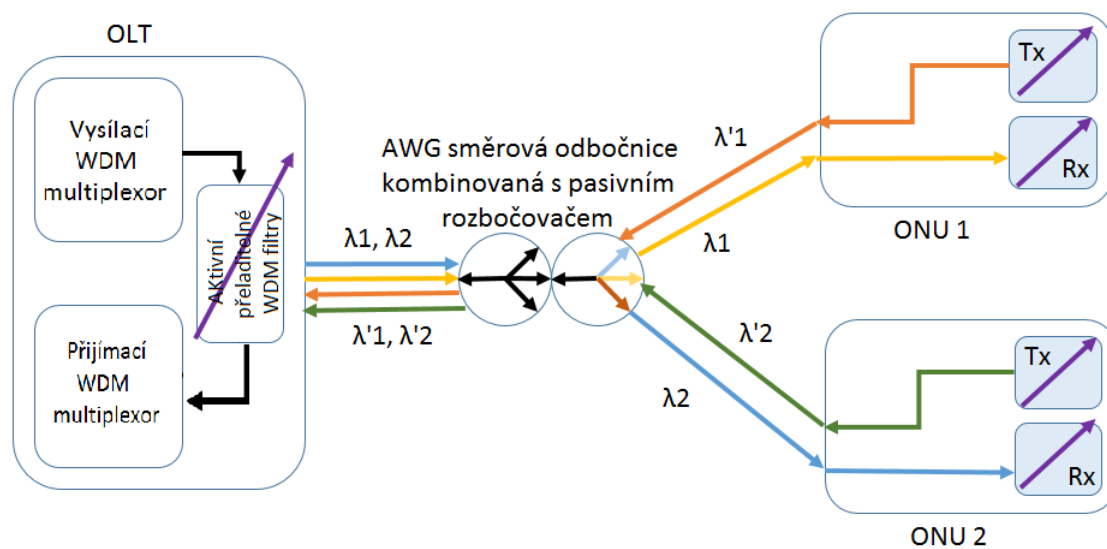
Obr. 2.4: WDM-PON s využitím směrové odbočnice typu AWG.

### 2.2.3 Vlnové dělení s využitím pasivního rozbočovače a směrové odbočnice AWG

Třetím způsobem realizace je kaskádní zapojení pasivních rozbočovačů a směrových odbočnic zobrazené na obr. 2.5, kdy budou k jednotlivým výstupům optického rozbočovače zapojeny AWG odbočnice, nebo několik odbočnic kaskádně. V případě použití více AWG odbočnic lze dosáhnout větší přesnosti při vydělování jednotlivých vlnových délek. Tato vlastnost dává předpoklad pro nasazení hustého vlnového multiplexu. Obsahují-li koncové jednotky a centrální jednotka laditelné WDM filtry, lze

dosáhnout dynamičnosti celého systému. Pokud jsou použity univerzální (laditelné) koncové jednotky, lze docílit možnosti přeladování kanálů dle aktuální potřeby a vytížení. Jedná se tak o dynamické přidělování přenosových kapacit DWA (Dynamic Wavelength Assignment), což odpovídá DBA u TDM-PON [18].

Ve vzestupném směru je možné nasadit technologii CPON (Composite PON), což je varianta se sdílenou vlnovou délkou a s použitím sdíleného přístupu TDMA. Nabízí se také varianta nasazení širokopásmového optického zdroje [18].



Obr. 2.5: Kaskádní zapojení AWG odbočnic a pasivních rozbočovačů.

## 2.2.4 UDWDM-PON

Jedná se o poměrně nově zvažovanou technologii, při jejímž nasazení lze docílit ultra jemného vlnového dělení za použití koherentní modulace. To má za následek zajištění vyšší přenosové kapacity proti staršímu typu DWDM. Systém využívá takzvaný Nyquist-WDM uplink, vytvářející signál s třinácti soudružnými vlnami o frekvenci 25 GHz [1]. Vlny individuálně přenášejí až 100 Gbit/s s použitím PM-QPSK (Polarization-Multiplexing and Quadrature Phase Shift Keying) [1, 20]. UDWDM plní základní požadavky (např. velikost šířky pásma nebo snížení hardwarové složitosti ONU) pro nasazení v PON nové generace.

## 2.3 OFDM-PON

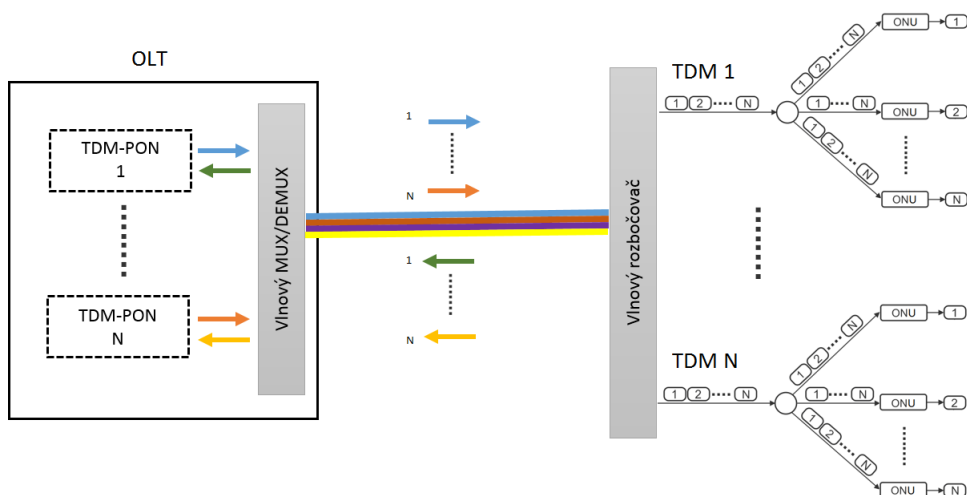
Dalším možnou (prozatím jen zvažovanou) realizací sdružování kanálů je modulační metoda OFDM. Pro modulaci desítek až stovek nosných kmitočtů se vyu-

žívá modulačních technik QPSK případně M-QAM (M-ary Quadrature Amplitude Modulation). Jednotlivé nosné kmitočty splňují vzájemnou podmínku ortogonality a využívá se ochranných intervalů mezi vysíláním informací.

Tato technologie se vyznačuje vysokou odolností vůči interferencím mezi symboly ISI (Inter Symbol Interface), mezi symboly nosných ICI (Inter Carrier Interference) a dobrou spektrální účinností. Systém je ovšem velice náročný na aplikaci mnoha-bitových převodníků a vyžaduje komplikovanou synchronizaci [1].

## 2.4 TWDM-PON

Velký pokrok v pasivních optických sítích, vzhledem k zvyšování šířky pásma, znamená nasazení hybridní technologie využívající kombinaci časového a vlnového sloučování kanálů, zobrazené na obr. 2.6.



Obr. 2.6: Princip TWDM-PON.

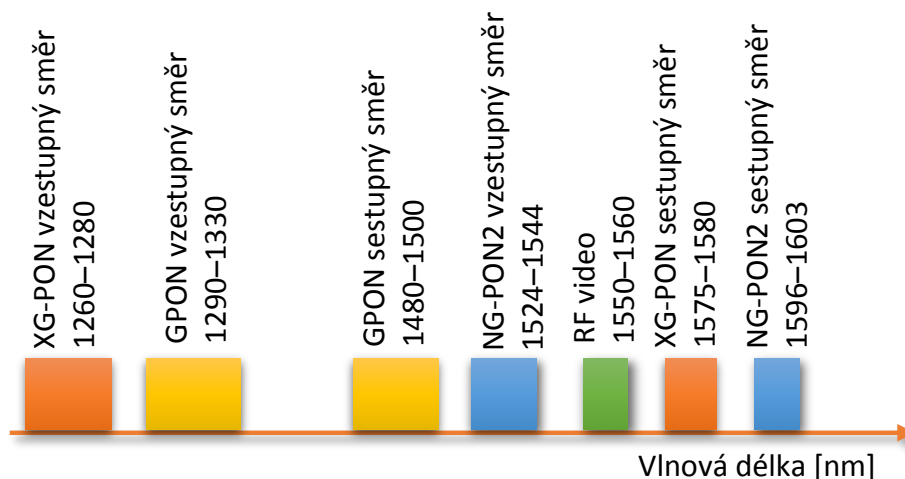
Na strukturu lze nahlížet jako na  $N$  vzájemně nezávislých sítí s časovým dělením, které jsou vlnově odděleny v sestupném i vzestupném směru. Z OLT je vysíláno  $N$  vlnových délek, ty na druhém konci ODN zpětně rozdělí vlnový rozbočovač. Tyto rozdělené vlnové délky jsou pak individuálně zpracovávány jako samostatné časově sloučené systémy. Koncové jednotky si pak vybírají data pro ně určená a ostatní zahazují. Je tak nutné zabezpečit šifrování. Je-li aplikována například technologie DWDM s 32 kanály, kdy pro každý z kanálů bude zahrnovat ve svém časovém multiplexu 16 koncových uživatelů, lze docílit celkového počtu 512 ONU jednotek (tedy výsledného dělicího poměru 1:512). V praxi s nasazením této technologie počítá standard NG-PON2.

V kombinaci s využitím dynamického přidělování vlnových délek DWA a časových oken DBA (tato technologie je nazývána DWA/DBA) lze docílit vysoké efektivity, kdy OLT přiděluje dle aktuální situace nejen časový interval, ale i vlnovou délku kanálu. Zpětně jednotlivé ONU (ONT) mohou žádat o přidělení dalšího časového okna, o přidělení další vlnové délky nebo, v případě potřeby o zvýšení šířky pásma. Je tak zvýšena efektivita systému proti statickému definování [1].

### 3 KOEXISTENCE A MIGRACE

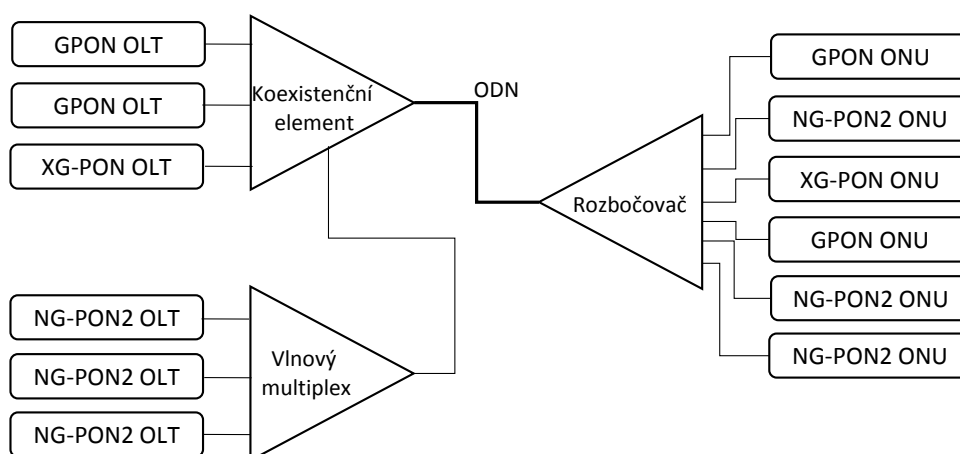
V rámci koexistenčního schématu hraje významnou roli koexistenční element. Tento element má za úkol zajistit možnost existence dvou a více standardů na dané PON [7].

Při koexistenci v pasivních optických sítích je klíčové dodržovat definované odstupy vlnových délek jednotlivých standardů. Nedojde tak k jejich rušení, případně překrytí a následné degradaci kanálů, což lze vidět na obr. 3.1.



Obr. 3.1: Přiřazení pásem vlnových délek pro jednotlivé standardy [10, 14, 15, 17].

Typickým představitelem takovéto infrastruktury, složené z výše jmenovaných standardů, je pasivní optická síť znázorněná na obr. 3.2.



Obr. 3.2: Blokové schéma koexistence GPON, XG-PON a NG-PON2 [6].

Nezbytnou součástí systému je koexistenční element, díky němuž mohou být zachovány dřívější standardy XG-PON a GPON. Před nasazením NG-PON2, síť pracovala na volných vlnových délkách přiřazených XG-PON.

Takovýto model se ovšem používá jen vzácně. Spíše se lze setkat s použitím jednoho vybraného standardu, na kterém pracuje celá infrastruktura. Proto se zavádí termín migrace mezi jednotlivými standardy.

## 3.1 Přechod mezi standardy

Vedle koexistence je také nezbytné řešit přechod mezi standardy (migraci), případně držet se doporučeného postupu při realizaci nové PON sítě investorem. Odpovědí na tyto otázky je standard ITU-T G.989.1<sup>1</sup>.

Tento standard definuje dva možné scénáře, takzvané zelené a hnědé pole [6, 14].

### 3.1.1 Zelené pole

Tato varianta nastává v případě, kdy v investorem nově budované síti neexistuje starší standard. Dojde tak dle ITU-T G.989.1 k nasazení NG-PON2 a současně není nutno zabývat se problematikou koexistence [6, 14].

### 3.1.2 Hnědé pole

Situace, kdy již je v síti investora nasazen některý ze standardů (GPON, XG-PON aj.), nese označení hnědé pole a definuje následující požadavky [6, 14]:

- na již existujícím vlákne, musí probíhat koexistence všech běžících standardů,
- minimální, pokud možno žádné, výpadky u uživatelů se staršími standardy,
- NG-PON2 musí podporovat/emulovat všechny starší PON standardy,
- mezi starší standardy patří GPON a XG-PON.

Dále existují dvě varianty přechodu mezi jednotlivými standardy, respektive dvě varianty aktualizací na novější standard.

- **Přímá migrace**, v podstatě se jedná o postupnou aktualizaci standardů. Pokud má být docíleno nahrazení standardu GPON za NG-PON2, v první fázi GPON nahradíme za XG-PON. XG-PON pak aktualizujeme do cíleného standardu NG-PON2. Výhodou je uvolnění oblastí vlnových délek dřívějších standardů pro nasazení v NG-PON2.

---

<sup>1</sup>Kapitola popisující přechod mezi standardy je psána z pohledu technologie NG-PON2. Scénáře typu zelená a hnědá pole, jsou definovány obdobně ve standardu ITU-T G.987.1 pro XG-PON.

- **Flexibilní přechod**, u tohoto typu přechodu se vynechává krok aktualizace GPON na XG-PON a dochází k aktualizaci přímo na NG-PON2, případně musí být splněna vzájemná koexistence.

## 4 XG-PON

Projekt XG-PON vznikl v roce 2010, tedy po dokončení a schválení standardu GPON společností ITU. Někdy bývá také označován jako NG-PON1 pro přenosovou rychlost 10 Gbit/s směrem k uživateli a 2,5 Gbit/s od uživatele, případně ve druhé variantě XG-PON2 nabízející přenosovou rychlost 10 Gbit/s pro oba směry, která ovšem není tak využívána vzhledem k dosavadní přenosové rychlosti předchozí varianty s 2,5 Gbit/s ve vzestupném směru.

Jedním z hlavních důvodů vzniku tohoto standardu byla myšlenka realizace PON sítě s přenosovou rychlostí 10 Gbit/s, která bude splňovat koexistenci s předchozí generací pasivní optické sítě. Je tak poskytnuta garance bezproblémového přechodu z technologie GPON na XG-PON pomocí vlnového multiplexu. Dále se také XG-PON snaží zachovávat vlastnosti z těchto standardů [9]:

- **ITU-T G.982** – problematika optických přístupových sítí pro podpůrné služby ISDN (Integrated Services Digital Network),
- **ITU T G.983.x** – problematika širokopásmových přístupových systémů na PON,
- **ITU-T G.984.x** – problematika týkající se standardu GPON.

Finální verze XG-PON je popsána ve čtyřech dokumentech, respektive standardech:

- **ITU-T G.987.1** – zde se nachází obecné doporučení, architektura sítí, pojednání o nasazení do FTTx [9],
- **ITU-T G.987.2** – druhý dokument popisuje fyzickou vrstvu standardu (linkové kódy, hodnoty útlumu, přenosové rychlosti, přenosové vzdálenosti, pracovní vlnové délky) [10],
- **ITU-T G.987.3** – popisuje detailní strukturu rámců, jejich zapouzdření a technologii sdružování kanálů [11],
- **ITU-T G.987.4** – se zabývá sítěmi XG-PON delšího dosahu [12].

### 4.1 Fyzická vrstva

Pasivní optická síť, respektive její ODN část je realizována jedním optickým vláknem dle ITU-T G.652 a obousměrný přenos je realizován pomocí vlnového dělení WDM. Základní parametry fyzické vrstvy jsou popsány v tab. 4.1.

Tab. 4.1: Přehled parametrů fyzické vrstvy XG-PON [10].

	Vzestupný směr	Sestupný směr
Přenosová rychlost [Gbit/s]	2,48832	9,95328
Optické vlákno	ITU-T G.652	ITU-T G.652
Dosah [km]	20–40	20–40
Kódování	NRZ	NRZ
Vlnová délka [nm]	1260–1280	1575–1580
Disperze 20 km [ps/nm]	0–140	0–400
Disperze 40 km [ps/nm]	0–280	0–800
Bitová chybovost	$10^{-12}$	$10^{-12}$

Podstatnou součástí standardu XG-PON je definování útlumových tříd. Definované útlumové třídy nesou označení nominální třída 1 a 2 (N1, N2) a rozšířená třída 1 a 2 (E1, E2), viz tab. 4.2.

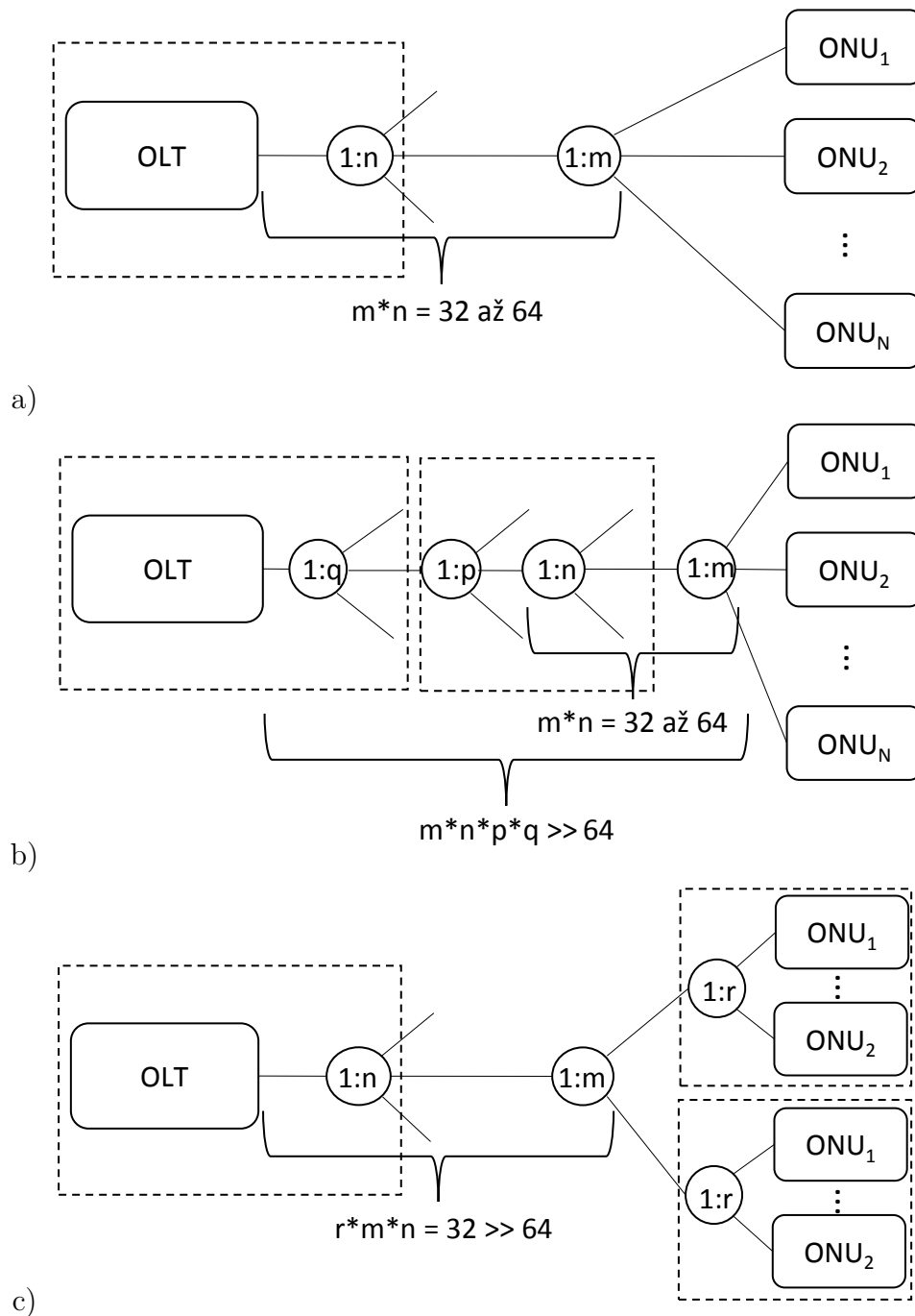
Tab. 4.2: Útlumové třídy XG-PON [10].

Útlumová třída	N1	N2	E1	E2
Minimální ztráta [dB]	14	16	18	20
Maximální ztráta [dB]	29	31	33	35

#### 4.1.1 Dělicí poměr

Vzhledem k již existujícím infrastrukturám pasivních optických sítí, jsou požadavky na dělicí poměr stanoveny minimálně 1:32 respektive 1:64. Z ekonomického hlediska a perspektivy nově vznikajícího standardu bylo ovšem nutné zabývat se možnostmi navýšení tohoto poměru. Díky tomu XG-PON umožňuje dělicí poměr až 1:256, není ovšem vyloučeno dosažení připojení vyššího počtu ONU jednotek. Je také velice vhodné definovat více struktur (topologií) pro připojení jednotlivých ONU.

V případě návrhu síťové architektury lze vycházet ze tří příkladových modelů definovaných standardem. Příklad znázorněný na obr. 4.1 a), definuje základní rozložení  $m$  ONU jednotek připojených k OLT (v tomto případě  $n=1$ ) a za předpokladu  $m=64$  lze získat dělicí poměr 1:64. V ostatních případech je znázorněna metodika připojení více uživatelů (vyšší dělicí poměr) na základě rozšíření přenosové cesty na obr. 4.1 b), případně navýšením skupin koncových uživatelů připojených k pasivní optické síti obr. 4.1 c). Tyto dva případy tak definují dělicí poměr mnohem vyšší než 1:64.



Obr. 4.1: XG-PON vytváření dělicího poměru [10].

## 5 PŘENOSOVÁ VRSTVA XG-PON

Přenosová vrstva zajišťuje v modelu XG-PON velice důležitou roli a je jednou z klíčových problematik této práce. Z toho důvodu je jí věnována velká pozornost a pojednává o ní celá následující kapitola. Standardem je nazývána jako XGTC (XG-PON Transmission Convergence Layer) a je popsána ve standardu ITU-T G.987.3. V podstatě definuje postupy od formátování datových jednotek SDU (Service Data Unit) na jedné straně, po sestavení datový tok vhodně přizpůsobený modulování a navázání na přenosové médium. Samotná XGTC vrstva je rozdělena do 3 pomyslných podvrstev:

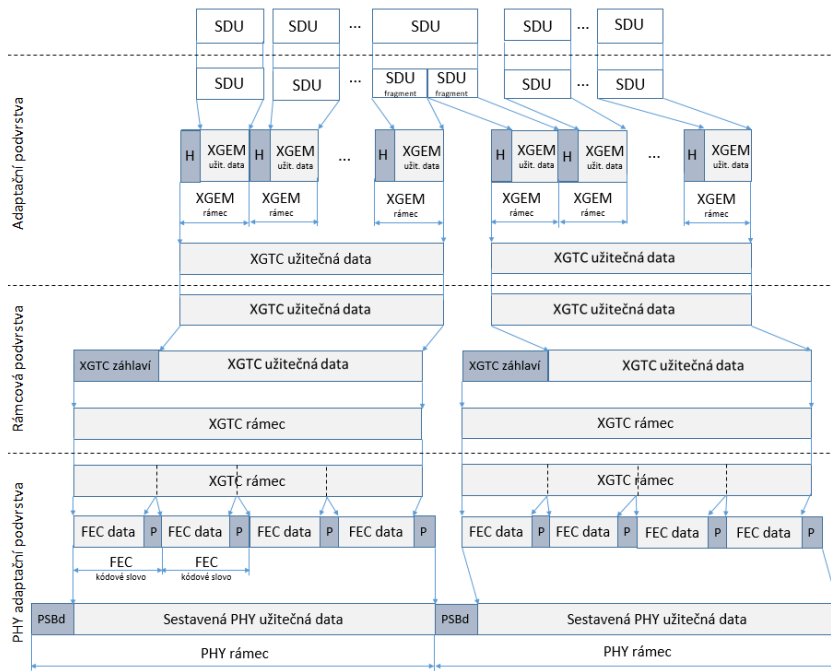
- XGTC adaptační podvrstva.
- XGTC rámcová podvrstva.
- XGTC PHY adaptační podvrstva.

XGTC vrstva figuruje jak na ONU jednotkách, tak na OLT pro zajištění kompletní komunikace mezi nimi v sestupném i vzestupném směru. Jedná se o komunikaci P2MP se schopností dělicího poměru teoreticky až 1:256. Pro oba tyto směry existuje specifický proces sestavení datových jednotek SDU do podoby vhodné pro přenos v pasivní optické síti. Jedná se o způsob zapouzdření XGEM (XG-PON Encapsulation Method) rámců, tedy vhodné vymezení a fragmentace jednotlivých SDU, dále sestavení rámcové podvrstvy a o zajištění správné funkce adaptační podvrstvy včetně zajištění FEC<sup>1</sup> (Forward Error Correction) a kódování. XGTC PHY (Physical Interface) adaptační podvrstva je složená z PHY rámců dlouhých 125  $\mu$ s pro sestupný směr, u vzestupného směru je to sekvence přesně velkých časových okamžiků PHY burst (v české literatuře překládán jako shluk). Další důležitou funkcí přenosové vrstvy je implementace TDMA ve vzestupném směru a schopnost dynamického přidělování šířky pásma. Dále popis aktivace jednotlivých ONU jednotek, autentizační metody při ověřování identity, distribuce šifrovacích klíčů a v neposlední řadě metody úspory energie označované jako ONU Power Saving [11].

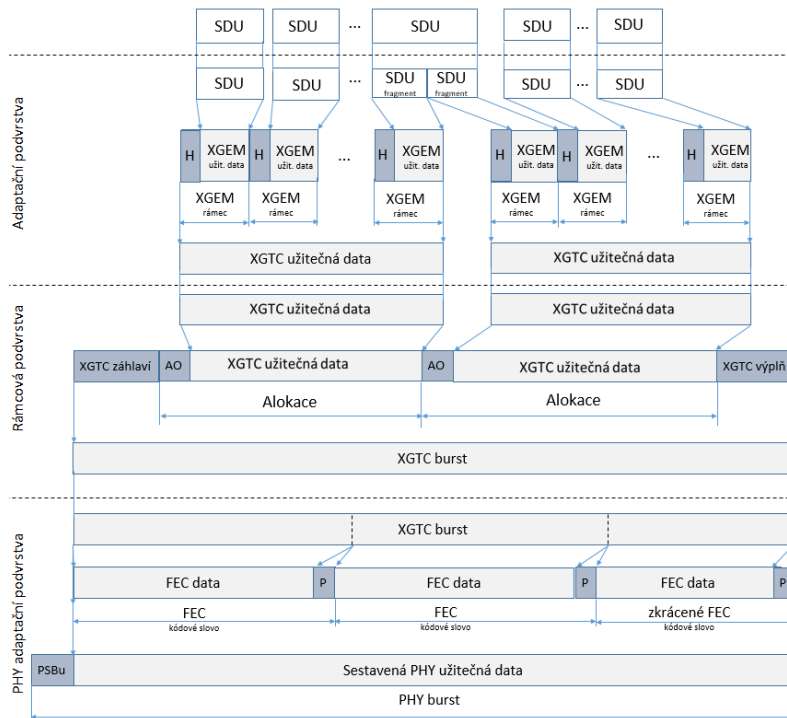
V následujících odstavcích budou definovány kompletní struktury pro oba přenosové směry, detailně budou rozebrány jejich jednotlivé součásti (dílní rámce) a bude vysvětlen průběh navázání komunikace mezi OLT a jednotlivými ONU, u kterých je zapotřebí věnovat se jednotlivým provozním stavům.

---

<sup>1</sup>Problematice týkající se FEC je věnována samostatná kapitola.



Obr. 5.1: Struktura rámců XG-PON pro sestupný směr [11].



Obr. 5.2: Struktura rámců XG-PON pro vzestupný směr [11].

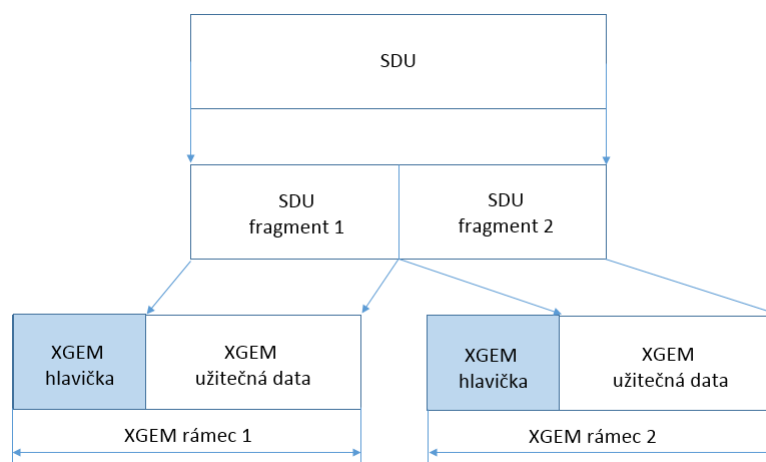
## 5.1 XGTC adaptační podvrstva

Adaptační podvrstva XGTC zodpovídá za horní datové vrstvy SDU, respektive za jejich zapouzdření a přenos v ODN. Na straně vysílače adaptační vrstva XGTC přijímá uživatelské datové rámce SDU spolu s ONU ovládacími a kontrolními prvky, dle potřeby přiřazuje jednotlivým SDU nebo SDU fragmentům XGEM Port-ID a zapouzdřením vytváří jednotlivé XGEM rámce. Užitečná výplň XGEM rámců může být dle potřeby šifrována. Série XGEM rámců vzájemně tvoří ve směru zapouzdření užitečný obsah jednotlivých XGTC rámců, a tedy i přechod do další pomyslné podvrstvy modelu [11].

### 5.1.1 SDU fragmentování

Fragmentace SDU je proces uzpůsobení velikosti datových jednotek pro následné využití v XGEM rámcích pro sestupný i vzestupný směr. Jedná se o rozdělení SDU na jeden a více fragmentů vzhledem k jejich nadstandardní velikosti, která nevyhovuje potřebám velikosti užitečné výplně XGEM.

Proces fragmentace (viz obr. 5.3) se rozlišuje pro jednotlivé směry přenosu a řídí se několika základními pravidly.



Obr. 5.3: Fragmentování SDU jednotek [11].

V případě sestupného směru, je-li k dispozici alespoň 16 bajtů v XGTC užitečném datovém zatížení, se nachází SDU jednotka přesahující tuto velikost po zapouzdření do XGEM rámce. Tato jednotka bude rozdělena na fragmenty tak, že první z nich bude zcela vyplňovat mezeru v XGTC užitečném zatížení (tedy 8 bajtů hlavička XGEM a minimálně 8 bajtů XGEM užitečné zatížení), zatímco druhý fragment je přenesen v druhém XGTC užitečném zatížení. Pokud je druhý fragment menší

než 8 bajtů, musí být doplněn nulami, aby splňoval požadavek minimální velikosti 16 bajtů. V sestupném směru není podporováno přeskládávání SDU a prioritně je tedy do následující XGTC užitečné výplně vložen zbývající druhý fragment a následně ostatní SDU.

U vzestupného směru je logika fragmentování velice podobná sestupnému směru. První fragment zaujímá taktéž doplněk do XGTC užitečného zatížení, druhý fragment je pak přenášený v následujícím XGTC užitečném zatížení ovšem se stejným ALLOC\_ID (Allocation Identifier).

Pravidla platící pro oba směry říkají, že pokud je v důsledku fragmentace získán druhý fragment SDU menší než 8 bajtů, musí být doplněn na minimální velikost právě 8 bajtů nebo vyšší. Fragmentace je zakázána, pokud velikost užitečného místa v XGTC je stejná nebo vyšší než sestavený XGEM rámeček (8 bajtů hlavička XGEM a minimálně 8 bajtů XGEM užitečné zatížení). Poslední společné pravidlo říká, že pokud je zbývající velikost v XGTC užitečném zatížení menší než 16 bajtů, je toto místo vyplněno prázdným neboli nečinným XGEM rámečkem [11].

## ALLOC\_ID

Jedná se o 14bit hodnotu, která je přiřazena ONU jednotce OLT jednotkou k zajištění identifikace při přenosu dat. Každá ONU obsahuje nejméně jednu ALLOC\_ID. U výchozího nastavení platí že počet ALLOC\_ID je roven ONU\_ID (ONU Identifier). Rozsah přiřazovaných ALLOC\_ID je uveden v tab. 5.1 [11].

Tab. 5.1: Rozsah hodnot ALLOC\_ID.

ALLOC_ID	Typ	Účel
0–1022	Výchozí	Výchozí hodnoty pro výběr ALLOC_ID.
1023	Broadcast	Označuje všesměrový přenos.
1024–16383	Přiřazené	Používá se v případě, kdy ONU vyžaduje více než jednu ALLOC_ID.

## ONU\_ID

Je složeno z 10 bitů a označuje ONU identifikátor specifikující příjemce zprávy v sestupném i vzestupném směru. Během ONU aktivace je vybrán rozsah 0 až 1022. Zpráva odeslaná na ONU\_ID 1023 označuje všesměrový přenos v sestupném směru případně nenastavené ONU\_ID ve směru vzestupném. Rozsah ONU\_ID je uveden v tab. 5.2 [11].

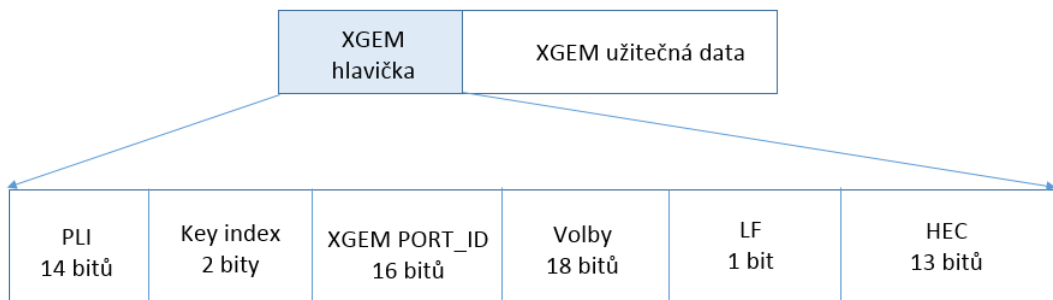
Tab. 5.2: Rozsah hodnot ONU\_ID.

ONU_ID	Typ	Účel
0–1022	Výchozí	OLT přiděluje ONU_ID z tohoto rozsahu ONU jednotce při její aktivaci. ONU_ID slouží pro identifikaci jednotky ve vzestupném i sestupném směru.
1023	Broadcast	Označuje všesměrový přenos.

### 5.1.2 XGEM rámeček

Další podstatnou částí v procesu zapouzdřování je sestavení XGEM rámečku, tedy složení jeho hlavičky, oblasti užitečných dat a vyplňování XGTC užitečných dat prázdným XGEM rámečkem.

#### Hlavička XGEM rámečku



Obr. 5.4: Struktura XGEM rámečku [11].

- **PLI (Payload Length Indication)** – označuje identifikaci velikosti užitečných dat a jedná se o celé číslo 0 až 16383 (14bit) délky L v bajtech z SDU jednotky nebo SDU fragmentu přiřazeného danému XGEM rámečku. Velikost PLI je dostačující pro zakódování délky rozšířeného Ethernetového rámečku (až do 2000 bajtů) a také velkého Ethernetového rámečku označovaného jumbo (velikost až 9000 bajtů). PLI je definováno na přesnost 1 bajtu, není proto nutně rovné velikosti XGEM užitečného zatížení, které je uspořádáno po čtveřicích bajtů.
- **Key index** – identifikátor šifrování dat používaný k šifrování XGEM užitečných dat. V závislosti na XGEM PORT\_ID odkazuje na jedinečný nebo všesměrový typ klíče. V daném časovém okamžiku jsou v platnosti až dva klíče. Binární hodnota 01 odkazuje na první klíč, binární hodnota 10 na druhý klíč,

binární hodnota 00 definuje přenos bez šifrování a 11 tvoří rezervu pro budoucí využití. V případě, že tento index odkazuje na neplatný klíč, nebo obsahuje rezervovanou hodnotu, XGEM užitečná data jsou zahozena.

- **XGEM PORT\_ID** – 16bit struktura, kterou přiřazuje OLT jednotlivým logickým spojením. Hodnota XGEM PORT\_ID odpovídá ONU\_ID.

Tab. 5.3: Rozsah hodnot pro XGEM PORT\_ID [11].

XGEM PORT_ID	Typ	Účel
0–1022	Výchozí	Výchozí hodnoty XGEM PORT_ID
1023–65534	Přiřazené	Rozsah XGEM PORT_ID pro více ONU
65535	Nečinné	Vyhrazeno pro nečinný Idle XGEM PORT_ID

- **Volby** – toto pole je nastaveno na hodnotu 0x00000, je příjemcem ignorováno a prozatím nemá využití. Je určeno pro další výzkum.
- **LF (Last Fragment)** – identifikátor posledního fragmentu. Pokud je fragment zapouzdřen do XGEM rámce, je hodnota LF pro poslední fragment SDU nebo kompletní SDU nastavena na logickou 1, jinak je hodnota LF 0.
- **HEC (Hybrid Error Correction)** – hybridní korekce chyb, více v kapitole 5.7.

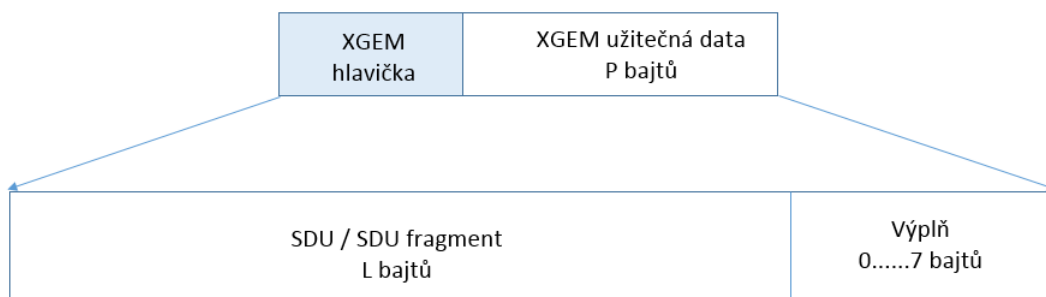
### Užitečná data XGEM rámce

Velikost pole s užitečnými daty v XGEM rámci se odvíjí od hodnoty PLI definované v záhlaví. Pokud XGEM rámec vykazuje činnost pro budoucí začlenění do XGTC užitečné datové výplně (není v nečinnosti), délka P v bajtech se vztahuje k hodnotě L z pole PLI v hlavičce dle následující definice uvedené v tab. 5.4.

Tab. 5.4: Výpočet délky P dle L [11].

$P = 0$	$L = 0$
$P = 8$	$0 < L < 8$
$4 * \left(\frac{L}{4}\right)$	$L > 8$

Užitečné pole XGEM může v případě potřeby obsahovat také výplň tvořenou až sedmi bajty na nejméně významných pozicích. Ve vysílači jsou do této výplně vloženy bajty s hodnotou 0x55, které příjemce zahazuje.



Obr. 5.5: Velikost XGEM užitečných dat [11].

### Nečinný XGEM rámec

Nastane-li případ, že vysílač nemá SDU nebo SDU fragmenty k zpracování (SDU jsou nezpůsobitelné pro přenos), nebo velikost SDU případně SDU fragmentů přesahuje dostupnou velikost v XGTC užitečném datovém rámci, bude vysílač generovat tzv. Idle XGEM rámce pro vyplnění XGTC užitečného datového prostoru.

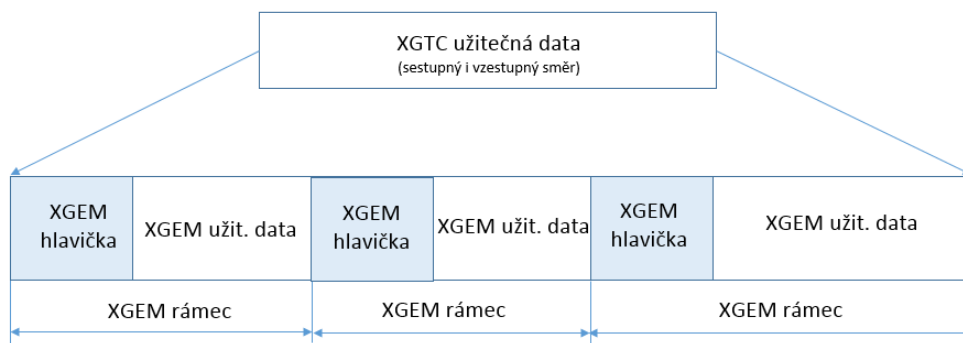
Tento speciální XGEM rámec má hodnotu `PORT_ID` nastavenou na `0xFFFF`, hodnota `PLI` odpovídá skutečné velikosti náhodného XGEM rámce (obsahuje nepodstatná, náhodná data o velikosti násobku 4 včetně nuly, velikost může být rovna až maximální podporované velikosti SDU). Dále jsou přenášeny nešifrovaně a jejich `LF=1`. Příjímáče všechny tyto parametry vyhodnocuje a takto označené příchozí rámce zahazuje.

Pokud v XGTC užitečném datovém rámci zbývá volný prostor o velikosti menší než XGEM záhlaví, vysílač bude generovat krátké Idle XGEM zprávy obsahující všechny bajty s hodnotou nula [11].

### 5.1.3 Užitečná data XGTC rámce

V posledním kroku zapouzdření v XGTC adaptační vrstvě dochází k vyplnění XGTC užitečných dat XGEM rámci. Každý XGEM rámec obsahuje 8 bajtovou hlavičku a datové pole proměnné délky (minimálně však 8 bajtů), pro vyplnění místa XGTC užitečných dat se dále využívá Idle (nečinného) XGEM rámce popsaného výše.

Pro sestupný směr je velikost XGTC užitečného datového rámce stanovena fixně na 135 432 bajtů s XGTC hlavičkou. Velikost pro vzestupný směr je dána příslušnou alokací. XGTC užitečný datový rámec obsahuje jeden, případně více XGEM rámců [11].



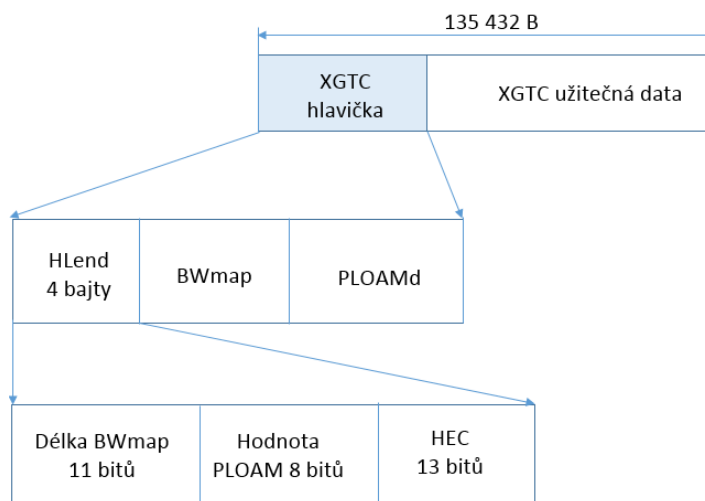
Obr. 5.6: Struktura XGTC užitečné datové části [11].

## 5.2 XGTC rámcová podvrstva

Druhou podvrstvou zapouzdřovacího modelu pro sestupný a vzestupný směr přebírající XGTC užitečná datová pole z XGTC adaptační podvrstvy je XGTC rámcová podvrstva. Jejím úkolem je sestavení kompletních XGTC rámců v případě sestupného směru a XGTC burst u směru vzestupného [11].

### 5.2.1 XGTC rámeček pro sestupný směr

Celková velikost XGTC rámečku přenášeného sestupným směrem je 135 432 bajtů a je tvořen hlavičkou XGTC a užitečným datovým polem. Popis získání užitečného datového pole je náplní předešlé kapitoly, zaměříme se tedy na hlavičku XGTC. Hlavička XGTC se skládá ze tří částí o dynamické velikosti viz obr. 5.7 [11].



Obr. 5.7: Struktura XGTC rámečku.

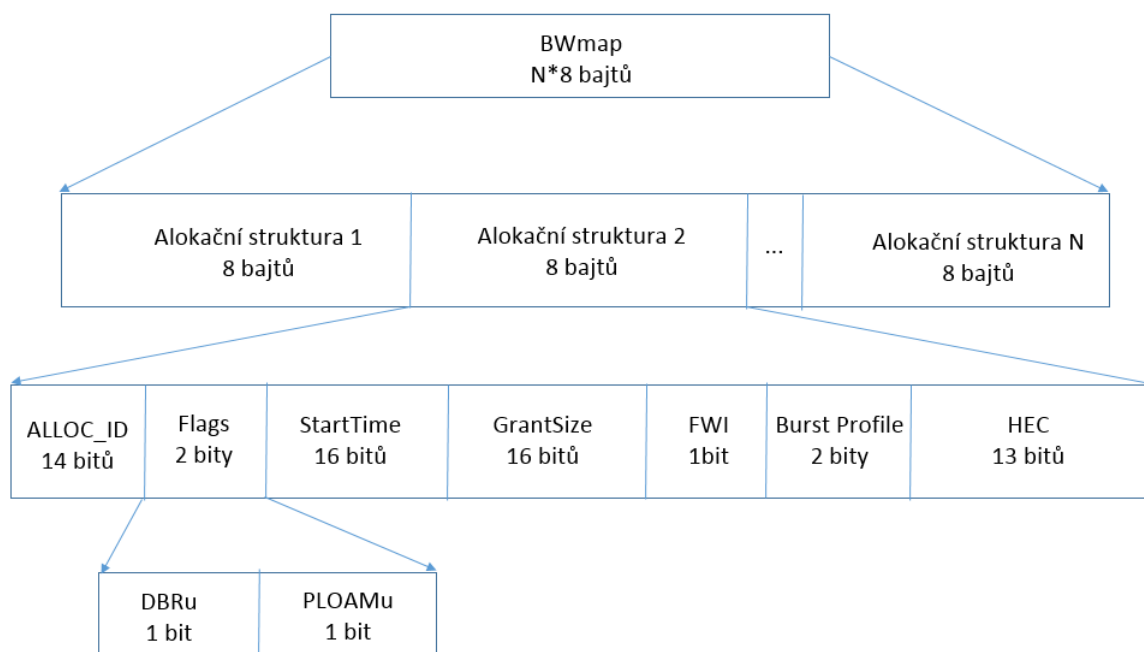
## HLend

Tato část kontroluje dynamickou část XGTC záhlaví, přenáší jeho aktuální velikost. Je tvořena 4 bajty, které se dále dělí na [11]:

- **Délka BWmap (Bandwidth Map)** – (11bit) celočíselná hodnota, udávající počet alokačních struktur v oddíle BWmap.
- **PLOAM (Physical Layer Operations, Administration And Maintenance)** – (8bit) nese číselný údaj odpovídající přenášené PLOAMd (Physical Layer Operations, Administration And Maintenance download).
- **HEC** – (13bit) hybridní korekce chyb, více v kapitole 5.7.

## BWmap

Jedná se o strukturu poskytující informaci o přidělování šířky pásma. Její velikost je zpravidla N násobek 8 bajtů a tuto hodnotu lze měnit dle ALLOC\_ID.

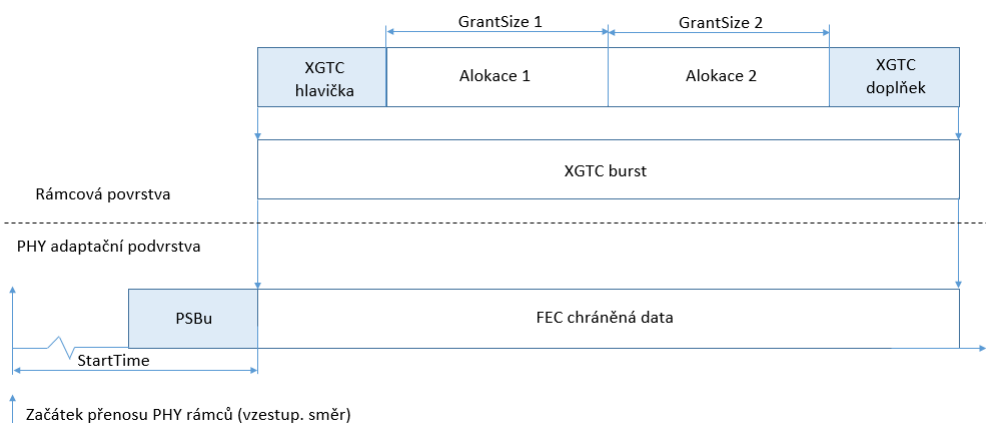


Obr. 5.8: Struktura BWmap [11].

- **ALLOC\_ID** – toto pole je definováno v kapitole 5.1.1.
- **Flags** – pole obsahující 2 samostatné identifikátory, prvním je DBRu (Dynamic Bandwidth Report Upstream). Na počátku každé alokace existuje záhlaví, které s sebou nese označení pro zprávu o dynamické šířce pásma ve vzestupném směru DBRu. Druhým identifikátorem je PLOAMu (Physical Layer Operations, Administration And Maintenance upload), a pokud je tento bit nastaven

v první alokační struktuře, velikost XGTC burst by měla být 52 bajtů a ONU předává PLOAM zprávu v rozšířeném záhlaví. Pokud PLOAMu bit v první alokační struktuře není nastaven, velikost XGTC burst záhlaví by měla být 4 bajty a PLOAM zpráva se nepřenáší. Pro všechny následné alokační struktury stejného formátu by hodnota PLOAMu neměla být nastavena ve vysílači, a tudíž by ji měl přijímač ignorovat.

- **StartTime** – jedná se o 16bit číslo, udávající polohu prvního bajtu XGTC burst záhlaví v předcházejícím PHY rámcu. Tato hodnota se měří od počátku PHY rámce ve vzestupném směru s přesností jednoho slova (4 bajty). Hodnota  $StartTime = 0$  odpovídá prvnímu slovu PHY rámce, hodnota  $StartTime = 9719$  pak slovu poslednímu. V každé alokační skupině je přenášena pouze počáteční specifická hodnota  $StartTime$ , ostatní hodnoty jsou pak nastaveny na  $0xFFFF$ .



Obr. 5.9: Definování  $StartTime$  a  $GrantSize$  parametrů [11].

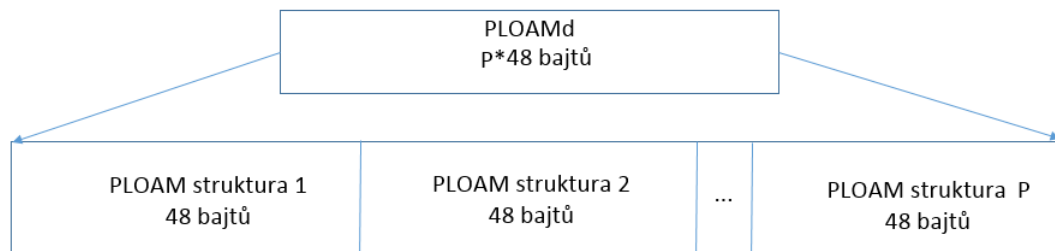
- **GrantSize** – jedná se o 16bit číslo, které označuje celkovou délku XGTC užitečných dat s DBRu v rámci dané alokační struktury. Hodnota  $GrantSize$  je definována s přesností jednoho slova (4 bajty) a nese v sobě hodnoty XGTC záhlaví, XGTC doplněk ani FEC režii. Minimální alokace jsou 4 slova, tedy  $GrantSize = 4$ , což odpovídá 16 bajtům.
- **FWI** – (Forced Wake-up Indication), neboli nucená indikace probuzení je realizována mezi OLT a ONU podporující úsporu energie. OLT vyšle příkaz k probuzení ONU jednotky, která byla doposud v režimu nízké spotřeby. Pokud to ONU vyžaduje, je FWI zpráva vyslána v první alokační struktuře každé alokační skupiny. Následující příchozí zprávy v rámci alokační skupiny obsahující FWI, ONU ignoruje.
- **BurstProfile** – jedná se o 2bit pole, obsahující index burst profilu pro přizpůsobení PHY adaptivní podvrstvě pro vytvoření PHY burst. Index je odkazem

na soubory platných burst profilů, které jsou známy ONU jednotce.

- **HEC** – hybridní korekce chyb, více v kapitole 5.7.

## PLOAMd

Toto pole obsahuje nula nebo více PLOAM zpráv. Výsledný počet se odvíjí od velikosti PLOAMd oblasti v HLEnd. Tyto zprávy jsou přenášeny ve velikosti  $P \times 48$  bajtů v XGTC záhlaví. Struktura PLOAMd je znázorněna na obr. 5.10 [11].



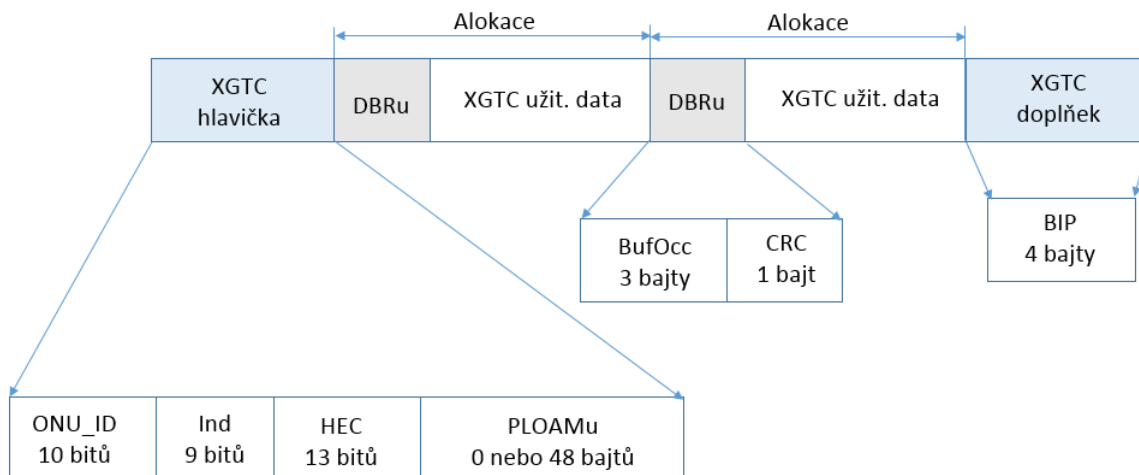
Obr. 5.10: Struktura PLOAMd.

Přenosový prostředek pro PLOAM zprávy je tedy hlavička XGTC rámce v souvislosti s přenosem sestupným směrem (v případě komunikace vzestupným směrem jsou PLOAM zprávy přenášeny XGTC burst). Tímto vnořeným komunikačním kanálem výrazně zrychlíme způsob komunikace oproti metodě OMCI (ONU Management Control Interface) používané u starších standardů. PLOAM zprávy podporují následující funkce [11]:

- vyjednání burst profilu pro komunikaci,
- registrace ONU,
- aktivace ONU,
- výměna autentizačního klíče,
- management napájení.

### 5.2.2 XGTC burst pro vzestupný směr

Ve vzestupném směru je XGTC rámcová podvrstva reprezentována XGTC burst. Každý přenos v ONU má dynamicky přidělenou jednu nebo více šířek pásma (dle ALLOC\_ID) a definovanou v XGTC burst hlavičce. Velikost každého přidělovaného intervalu je realizována přidělením BWmap konkrétní alokační struktury. Každý takto přidělený interval velikosti šířky pásma obsahuje XGTC užitečné datové pole a může obsahovat alokační režii předcházející XGTC užitečnému zatížení.



Obr. 5.11: XGTC burst a rozložení režijního pole [11].

### XGTC burst hlavička

Hlavička obsahuje pevnou část složenou z ONU-ID, Ind a HEC o celkové velikosti 4 bajty a následně proměnnou PLOAM zprávu o velikosti 0 nebo 48 bajtů. Velikost PLOAM se odvíjí od PLOAMu příznaku v BWmap [11].

- **ONU\_ID** – viz kapitola 5.1.1.
- **Ind** – pole velikosti 9bit definující rychlou nevyžádanou signalizaci ONU jednotky.
  - Nejvýznamnější bit č. 8 (MSB) – stav PLOAM fronty. Tento bit určuje frontu přenosu ve vzestupném směru a očekává se, že bude nadále probíhat přenos datových jednotek. Pokud není tento bit nastaven, neočekávají se žádné další PLOAMu zprávy.
  - Bity 7 až 1 – rezervováno.
  - Nejméně významný bit č. 0 (LSB) – označován jako poslední vzdech DG (Dying gasp). Pokud je bit nastaven, znamená to, že ONU detekovala lokální podmínky zabraňující reakci na přidělenou šířku pásma. Tento bit může OLT pomoci při detekci problému s přenosovým médiem, vyskytujícím se na přenosové trase. Vyslání DG vysílačem nemusí mít za následek úplné přerušování komunikace. Pokud se problém vyskytuje pouze náhodně a dále již nepřetrvává, ONU zruší tuto indikaci a přenos může dále pokračovat. Při vyslání této indikace, by OLT jednotka neměla tento požadavek vyhodnotit jako zrušení přidělené šířky pásma ONU jednotce.
- **HEC** – hybridní korekce chyb, více v kapitole 5.7.
- **PLOAMu** – pokud je pole PLOAMu obsaženo v XGTC hlavičce, jeho velikost je 48 bajtů (jedná se pouze o jednu PLOAM zprávu). OLT jednotka kontroluje,

zda je PLOAMu ve struktuře obsažena. PLOAMu je ukazatelem na první přichodí alokační strukturu v burst alokačním uspořádání.

### Režijní alokace

Pokud je aktivní alokační režie, je složena z DBRu struktury. Přítomnost DBRu je kontrolována OLT za pomoci DBRu příznaků odpovídajících alokační struktuře BWmap. DBRu pole je složeno ze zásobníku obsazenosti BufOcc (Buffer occupancy) a CRC kontrolního součtu [11].

- **BufOcc** – pole o velikosti 3 bajty vyjadřují celkové množství SDU provozu ve tvaru čtyřbajtových slov seskupených ve všech vyrovnávacích pamětech spojených s ALLOC\_ID, kterým byla alokace přidělena. Každé SDU disponuje velikostí L bajtů (velikost L je definována jako přirozené číslo), jeho hodnota BufOcc se pak vypočítá dle následující tabulky.

Tab. 5.5: Výpočet BufOcc W dle L.

$W = 2$	$0 < L \leq 8$
$W = \left(\frac{L}{4}\right)$	$L > 8$

Vypočtená hodnota by měla být nejlepším možným dostupným odhadem, odpovídajícím okamžiku přenosu zprávy, tedy na začátku alokačního intervalu přenášeného ve vzestupném směru. Tato hodnota by měla zahrnovat také předcházející vysílání v rámci daného alokačního intervalu. Při přenosu BufOcc je možné setkat se se dvěma výjimkami, jde o přenos 0x000000 (prázdna vyrovnávací paměť) a 0xFFFFFFFF (neplatný rozsah).

- **CRC** – ochrana DBRu pomocí CRC8.

### XGTC doplněk

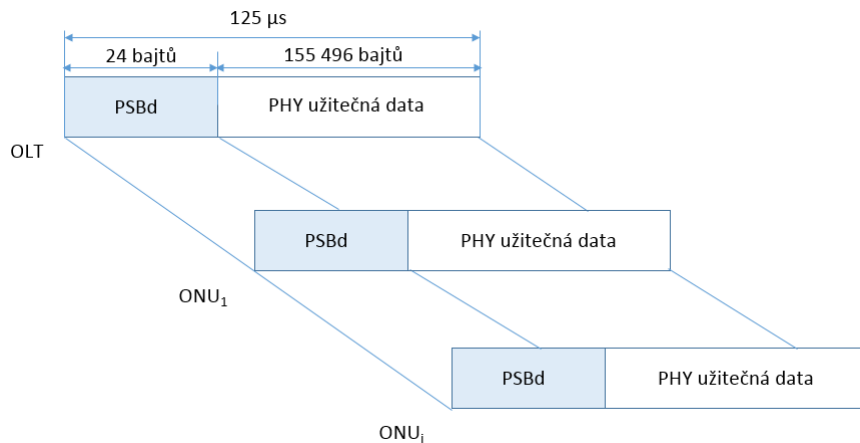
XGTC doplněk obsahuje 4 bajty dlouhou sudou paritu, vypočítanou z celého XGTC burst. OLT přijímač na základě přenesené parity vypočítá bitovou chybovost komunikačního kanálu ve vzestupném směru. To platí jen v případě vypnutí FEC v PHY adaptační podvrstvě. Pokud je FEC aktivní, bitová chybovost je vypočítána právě z něj [11].

## 5.3 PHY adaptační podvrstva

Poslední dílčí část přenosové vrstvy XG-PON tvoří PHY adaptační podvrstva. Jejím úkolem je vymezení a synchronizace fyzické vrstvy, zajištění FEC a kódování pro oba směry přenosu.

### 5.3.1 PHY rámec pro sestupný směr

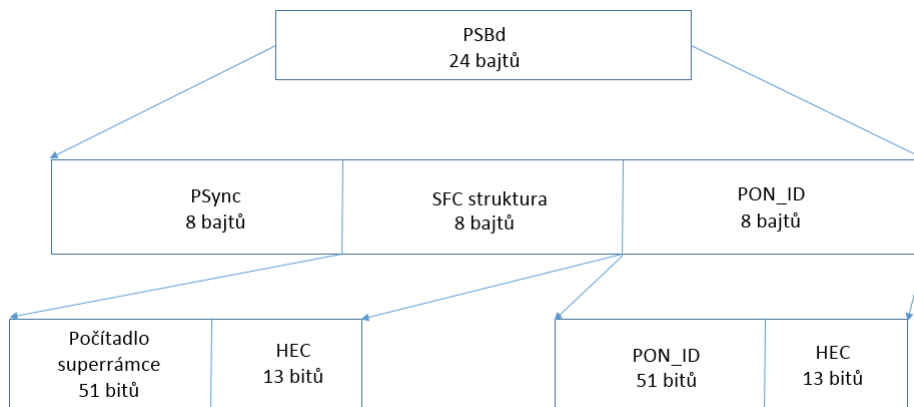
OLT nepřetržitě vysílá v sestupném směru k ONU jednotkám. Rámce, které jsou zasílány, mají pevně definovanou dobu trvání  $125 \mu\text{s}$  a pevnou velikost 155 520 bajtů (38 880 slov). Jsou složeny z fyzického synchronizačního bloku PSBd (Physical Synchronization Block downstream) délky 24 bajtů a PHY užitečného datového pole délky 155 496 bajtů, které je zabezpečeno pomocí FEC a kódováno.



Obr. 5.12: Struktura PHY rámce XG-PON [11].

#### PSBd

Jak již bylo naznačeno, PSBd tvoří hlavičku PHY rámce o velikosti 24 bajtů, přenášeného v sestupném směru. Samotné PSBd je složeno ze tří částí. Jedná se o PSync, SFC strukturu a PON\_ID.



Obr. 5.13: Struktura PSBd [11].

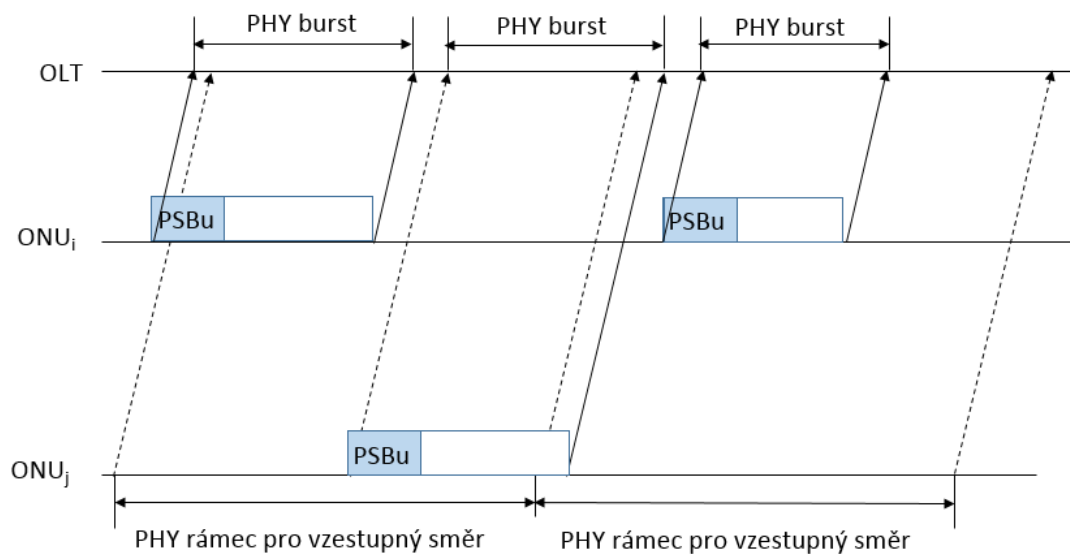
- **PSync** – pole velikosti 64bit, sloužící nejčastěji k synchronizaci PHY rámců v sestupném směru. Nejčastější případ hodnoty pro toto pole je 0xC5E5 1840 FD59 BB49.
- **SFC struktura** – struktura o velikosti 64bit složená ze dvou částí, počítadla superrámce a HEC.
  - Počítadlo superrámce – zaujímá velikost 51bit a s každým dalším odeslaným PHY rámcem je jeho hodnota zvýšena o 1 s ohledem na předchozí PHY rámeček. Při dosažení maximální hodnoty rozsahu obsahuje následující PHY rámeček hodnotu SFC rovnu 0.
  - HEC – hybridní korekce chyb, více v kapitole 5.7.
- **PON\_ID** – jedná se o 64bit strukturu rozdělenou do dvou dílčích částí.
  - PON\_ID – prvních 51bit slouží pro identifikaci pasivní optické sítě, výchozí nastavení je výplň nul.
  - HEC – hybridní korekce chyb, více v kapitole 5.7.

### 5.3.2 PHY rámeček a PHY burst pro vzestupný směr

Doba trvání PHY rámečku je stejně jako v sestupném směru stanovena na 125  $\mu$ s. Přenosová rychlost pro vzestupný směr je dle standardu 2,48832 Gbit/s, což odpovídá velikosti rámečku 38 880 bajtů (9 720 slov).

OLT určuje každé komunikující ONU jednotce časový okamžik, ve kterém může následně vysílat konkrétní PHY rámeček ve vzestupném směru, odpovídající počátečnímu bodu jednotlivých příchozích PHY rámců v sestupném směru. Sekvence PHY rámců ve vzestupném směru, určující hraniční časové body, slouží OLT jednotce jako sdílená reference v rámci dané PON. Ovšem tyto body neodpovídají žádné specifické události na rozdíl od hraničních bodů, které obsahuje PHY rámeček v sestupném směru, při kterých dochází k zahájení přenosu nebo příjmu potvrzení PSBd.

Ve vzestupném směru vysílá každá ONU sekvenci relativně krátkých PHY burst a mezi tímto vysíláním zůstává nečinná. PHY burst se skládá z fyzického synchronizačního bloku pro vzestupný směr PSBu (Physical Synchronization Block upstream) a PHY burst odpovídající XGTC burst, jejichž obsah může být zabezpečen pomocí FEC a je kódován. OLT využívá BWmap pro kontrolu časování a velikosti PHY burst jednotlivých ONU, aby nedošlo k jejich vzájemnému překrývání. PHY burst ve vzestupném směru každé ONU jednotky je referencí počátku příslušného PHY rámečku pro vzestupný směr. Jeden PHY burst náleží konkrétnímu PHY rámečku, pokud je definován v BWmap, která se přenáší sestupným směrem. Pokud tohle platí, první bajt XGTC burst záhlaví je přenesen v daném PHY rámečku a PSBu hlavička z PHY burst může být přenesena v předchozím PHY rámečku. PHY burst příslušný určitému PHY rámečku ve vzestupném směru může přesahovat velikost tohoto rámečku.

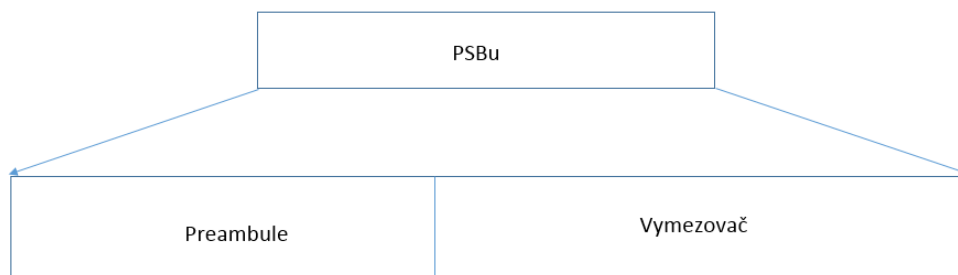


Obr. 5.14: PHY rámec a PHY burst pro vzestupný směr [11].

## PSBu

PSBu se skládá ze dvou částí, preamble a vymezovače. Jejich funkcí je umožnit OLT přijímači přizpůsobení na danou úroveň optického signálu o vymezené velikosti. Délka a vzor těchto částí PSBu tvoří burst profil. Nastavení povolených burst profilů je specifikováno OLT jednotkou za pomoci profilu PLOAM zprávy. Specifický profil je použit pro konkrétní PHY burst a je vybrán OLT z oblasti BurstProfile spadající do dané alokace BWmap.

Doporučená velikost preamble je 20 B s nejčastější hodnotou 0x AAAA AAAA, která může být rozdílná v závislosti na implementaci. Doporučená velikost oddělovače je 4 případně 8 B v závislosti na robustnosti burst. Dle typu oddělovače také lze určit, zda bude ve vzestupném směru použito FEC či nikoliv. Konkrétní typy preambulí, a jim příslušné vymezovače jsou uvedeny v kapitole 5.6. Struktura PSBu je znázorněna na obr. 5.15 [11].



Obr. 5.15: PSBu pro vzestupný směr.

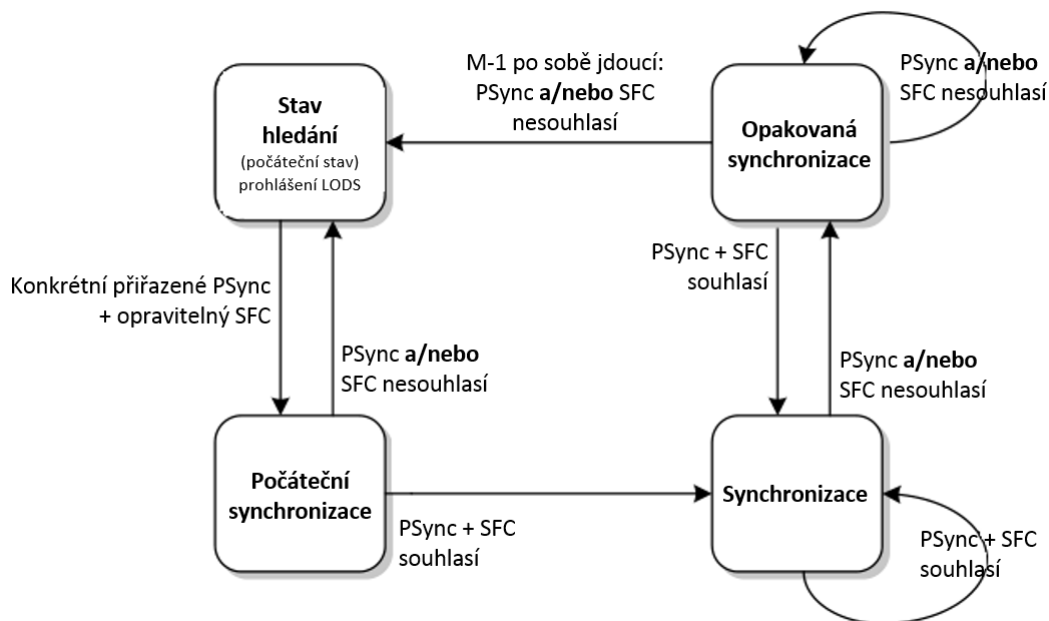
## 5.4 Stavy jednotek ONU

V rámci komunikace OLT jednotky s jednotlivými ONU, je možné se setkat s termínem aktivační proces. Jedná se o soubor distribuovaných funkcí, umožňující připojit nového zákazníka nebo obnovit její připojení. ONU jednotka tak může projít až sedmi stavy, v závislosti na procesu, kterým prochází.

Nejlépe lze průchod stavy demonstrovat na ONU jednotce, která je zařazena do aktivní PON sítě (tento případ také zahrnuje ONU, která již v minulosti byla součástí PON).

Předně, dojde-li k jejímu zapnutí a spuštění počátečního stavu, ONU nevytváří samovolně komunikaci ve vzestupném směru. Pokud by náhodně tuto komunikaci začala vytvářet, mohlo by dojít k obsazení některého z časových intervalů aktuálně používaných jinou ONU jednotkou. Tímto náhodným vysláním by tak s velkou pravděpodobností způsobila narušení již existující komunikace. ONU se tedy nachází v počátečním stavu **Initial State O1** a synchronizuje se s OLT pouze za pomoci signálu v sestupném směru. Pro synchronizaci v sestupném směru je použit synchronizační automat [5, 11].

Synchronizační automat využívá intervalů délky  $125 \mu\text{s}$ , tedy PSBd hlaviček PHY rámců. V PSBd hlavičce se jedná konkrétně o SFC strukturu a PSync. Pro počáteční synchronizaci je nutná shoda jak 64bit PSync, tak hodnota opravitelného SFC. Pro následné udržení synchronizace je dostačující shoda 62bit PSync spolu s navýšením SFC o 1 vůči předchozímu rámcu. Dále jsou tolerovány maximálně 3 pokusy o udržení synchronizace (standard definuje počet pokusů  $M$ ), než je vyhodnocena ztráta synchronizace v sestupném směru LODS (Loss Of Downstream Synchronization). Synchronizační automat je uveden na obr. 5.16 [5, 11].



Obr. 5.16: ONU synchronizační automat.

Jakmile je úspěšně provedena synchronizace v sestupném směru, ONU získá bitovou a rámcovou synchronizaci spolu s údajem o počtu rámců, které při komunikaci může využívat a vstoupí do druhého stavu **Serial\_Number State O2-3** [5, 11].

V tomto stavu ONU stále aktivně nekomunikuje. OLT periodicky vysílá informace, ve kterých definuje parametry pro připojení ONU k dané PON. Jedná se o opakované vysílání ve stovkách milisekund a vyšší. Na tuto zprávu musí ONU jednotka čekat. V případě že ONU přijme od OLT části PLOAM zpráv obsažených v XGTC rámcích, které potřebuje před samotným přihlášením, získá některý z burst profilů, který je obsažen v PLOAM, respektive v jeho části PROFILE. Jakmile ONU získá jeden nebo více profilů (více profilů lze získat na základě žádosti) pro komunikaci, po přijetí zprávy serial number grant, odpovídá pomocí XGTC rámce (rámec obsahuje XGTC záhlaví, které přenáší Serial\_Number\_ONU PLOAM zprávu a XGTC užitečné zatížení), čímž dochází k potvrzení nastaveného profilu (nutno potvrdit všechny získané komunikační profily). Pokud by ONU nezískala žádný burst profil, nebyla by zaslána zpráva serial number grant a ONU by nemohla být aktivně zařazena do komunikace v PON.

OLT také ověřuje povolení vysílání u všech příslušných ONU a tím vypočítá dostupné kapacity ve vzestupném směru, tyto volné kapacity jsou nabízeny formou zpráv serial number grant ONU jednotkám. Sekvenční číslo této zprávy určuje alokaci BWmap, zasílá se na všesměrovou ALLOC\_ID-1023 (všem ONU jednotkám) a požaduje odpověď formou PLOAM zprávy s nulovým XGTC užitečným zatížením.

Problém může nastat v případě, kdy více než jedna ONU jednotka (v téměř shodné vzdálenosti od OLT) odešle potvrzení získaného burst profilu. Touto shodou náhod by došlo ke kolizi zpráv v OLT a data by byla zahozena (došlo by k překrytí časových intervalů při přenosu vzestupným směrem). Mohlo by dojít k vytvoření chybové smyčky a opakovanému zahazování vzhledem k deterministickému řešení systému. Proto je k ONU odpovědi přiřazeno náhodné zpoždění 0 až 48 ms, díky kterému OLT je schopna postupně rozpoznat žádosti od více ONU jednotek (i v případě inicializace celé PON sítě). ONU jednotka v této fázi čeká na odpověď formou přiřazení ONU\_ID pomocí ASSIGN\_ONU\_ID s hodnotou ALLOC\_ID (0 až 1022) a OMCI XGEM PORT\_ID. Jakmile je tato komunikace zpracována, ONU přechází do stavu **Ranging State O4**. Při plynulém přechodu do tohoto stavu se očekává přidělení, respektive vypočítání vyrovnávacího zpoždění, které zůstává neměnné po celou dobu životnosti PON [5, 11].

Tato hodnota je specifická pro každou ONU jednotku, je nepřenositelná a odvíjí se od síťové topologie. ONU jednotka tedy očekává přidělení vyrovnávacího zpoždění od OLT. Na toto přidělení ONU odpovídá přímým zařazovacím grantem pomocí komunikace ranging grantu s danou hodnotou burst profilu ONU jednotky. Přenášená zpráva obsahuje registrační PLOAM zprávu a XGTC doplněk. ONU jednotka obdrží RANGING\_TIME zprávu s přidělením vyrovnávacího zpoždění a přechází do stavu **Operation State O5** [5, 11].

Ve stavu O4 navíc figuruje časovač TO1. Časovač TO1 tedy plní funkci maximální doby setrvání ve stavu O4, ve kterém může ONU jednotka čekat na přidělení vyrovnávacího zpoždění. Výchozí hodnota časovače TO1 je 10 s.

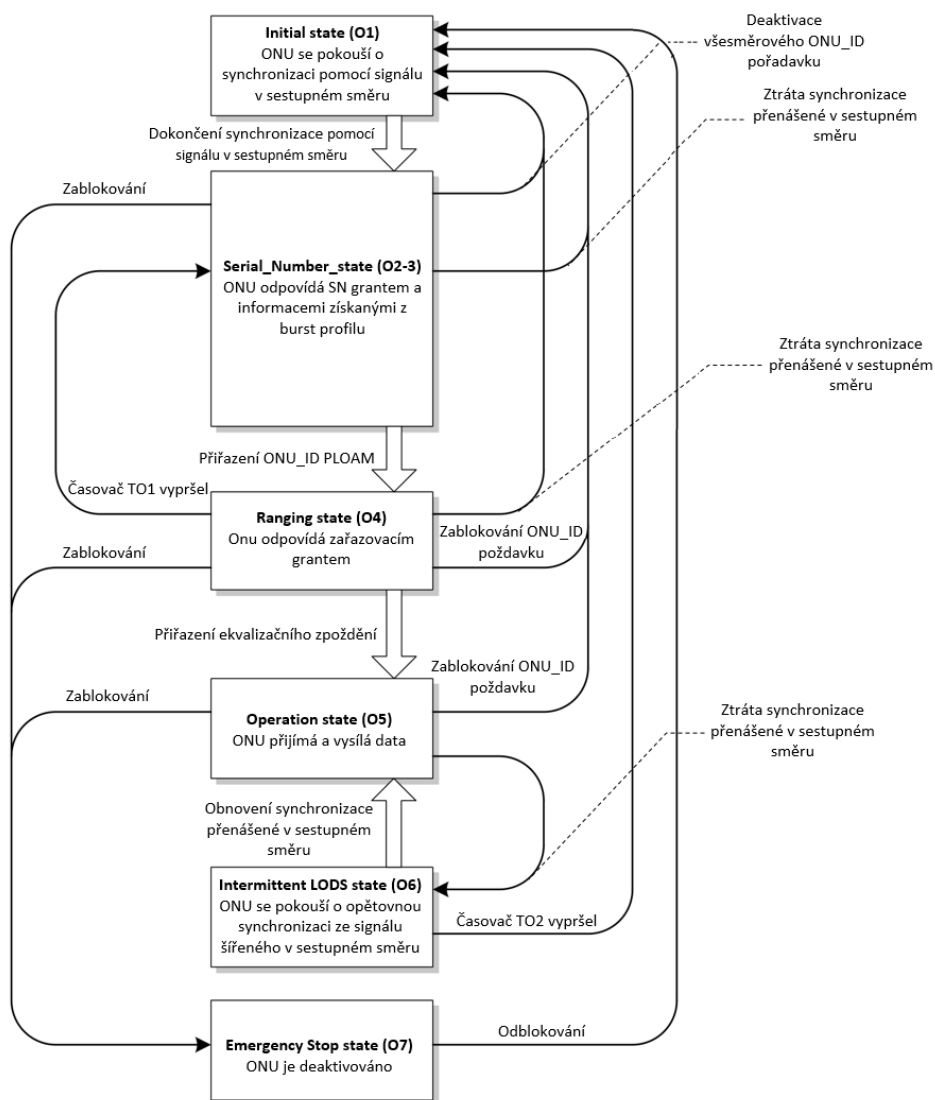
Pokud jsou veškeré podmínky pro přechod do stavu Operation State O5 splněny, probíhá datová komunikace s OLT (ve vzestupném i sestupném směru) na virtuálním spoji. Virtuální spoj není nic jiného než vymezený (alokovaný) prostor pro přenos dat a nemusí být pro danou ONU jediný. V tomto operačním stavu může také OLT vyžadovat po jednotlivých ONU jednotkách autentizaci. Výběr autentizační metody ze zvolené nabídky je na zvážení OLT jednotky.

Jestliže dojde ke ztrátě synchronizace v sestupném směru, dojde ke změně stavu ONU jednotky na **Intermittent LODS state O6**. V tomto stavu se využívá časovače TO2, který ve výchozím nastavení čeká 100 ms na opětovné obnovení synchronizace v sestupném směru (čeká se na přijetí PSBd hlavičky). Pokud v daném časovém intervalu dojde k obnovení synchronizace, ONU jednotka přechází zpět do stavu O5. V opačném případě dojde k návratu do stavu O1 [5, 11].

Posledním stavem, kterého může ONU jednotka nabýt je **Emergency Stop State O7**. Do tohoto stavu ONU přejde po obdržení zprávy o zablokování (zpráva disable obsažená v Disable\_Serial\_Number nacházející se v PLOAM), po jejímž přijetí přechází do neaktivního režimu a zahazuje veškeré získané parametry (ONU\_ID,

ALLOC\_ID, XGEM PORT\_ID, burst profil, vyrovnávací zpoždění a sdílené šifrovací klíče). Tento stav nachází využití v případech výpadku napájení, případně při restartování ONU. Při přechodu vypnuté ONU jednotky zpět do aktivního stavu, OLT vyśle zprávu o povolení taktéž pomocí Disable\_Serial\_Number. Jelikož došlo k odstranění přiřazených parametrů ONU jednotce, přechází do stavu O1 a čeká na synchronizaci v sestupném směru od OLT [5, 11].

Celý tento proces lze vyjádřit pomocí stavového diagramu viz obr. 5.17 [5, 11].



Obr. 5.17: Stavový diagram ONU jednotky.

Vzhledem k existenci velkého množství stavů ONU, je nezbytné seznámit se s jejich funkcí v příslušných operačních stavech. Je zřejmé, že řada událostí figuruje ve více než jednom provozním stavu dle toho, v jaké fázi komunikace se aktuálně

ONU jednotka nachází. Jedná se zejména o tyto události<sup>2</sup> [5, 11]:

- **zapnutí ONU**, pokud byl poslední stav před jejím vypnutím O7, po zapnutí setrvá opět ve stavu O7. Pokud byl její stav jiný, dojde k návratu do stavu O1,
- **dosažení synchronizace v sestupném směru**, nachází-li se ONU ve stavu O1, přejde do stavu O2-3. Pokud se nachází ve stavu O6, přechází do stavu O5 a zastavuje se časovač TO2,
- **ztráta synchronizace v sestupném směru**, nachází-li se ONU ve stavu O2-3, dojde k návratu do stavu O1. Pokud se tato událost objeví ve stavu O4, dojde k zastavení časovače TO1, zahození ONU\_ID, ALLOC\_ID, OMCI, XGEM PORT\_ID, burst profilu a k návratu do stavu O1. Pokud se ONU aktuálně nachází ve stavu O5, přejde do stavu O6 a zapne se TO2,
- **příjem všesměrové PLOAM Profile zprávy**, nachází-li se ONU ve stavu O2-3, O4 nebo O5 dochází k uložení nového profilu,
- **příjem jedinečné PLOAM Profile zprávy**, nachází-li se ONU ve stavu O4 případně O5, dojde k vytvoření nového profilu. U stavu O5 navíc dojde k odeslání potvrzení,
- **příjem všesměrové serial number grant zprávy**, pokud je grant profil znám, ve stavu O2-3 je nutné zaslat odpověď Serial\_Number\_ONU PLOAM,
- **příjem zprávy o přiřazení ONU\_ID\_PLOAM**, ve stavu O2-3 dojde k nastavení ONU\_ID, ALLOC\_ID, OMCI, XGEM PORT\_ID a k zapnutí časovače TO1. Pokud je tato zpráva přijímána ve stavu O4 a ONU\_ID je shodné s nastaveným, zpráva je ignorována. Pokud je ONU\_ID odlišné, dojde k smazání ONU\_ID, ALLOC\_ID, OMCI, XGEM PORT\_ID, burst profilu, zastavení časovače TO1 a návratu do stavu O1. Pokud je tato zpráva přijímána ve stavu O5, dojde k smazání ONU\_ID, všech ALLOC\_ID, OMCI, XGEM PORT\_ID, burst profilu, vyrovnávacího zpoždění a návratu do stavu O1,
- **příjem rozsahu grantu**, ve stavu O4 ONU odpovídá registrační PLOAM zprávou,
- **příjem přímého časového rozsahu PLOAM**, ve stavu O4 dojde k porovnání časového úseku. V případě podobnosti je tato zpráva ignorována, v opačném případě dojde k nastavení hodnoty vyrovnávacího zpoždění, zastavení časovače TO1, zaslání potvrzení a přechodu do stavu O5. Pokud se ONU nachází ve stavu O5 a příchozí zpráva o přiděleném časovém úseku je podobná stávající, dojde k přizpůsobení vyrovnávacího zpoždění. V případě rozdílu je nastavena hodnota z příchozí zprávy a v obou případech dochází k potvrzení,

---

<sup>2</sup>Každá událost, která přichází do ONU, má význam pro konkrétní stavy, ve kterých se aktuálně ONU nachází. Z toho důvodu prakticky neexistuje událost na kterou ONU reaguje ve všech ze 7 stavů.

- **příjem všesměrového časového rozsahu PLOAM**, pokud se ONU nachází ve stavu O5 a příchozí zpráva o přiděleném časovém úseku je podobná stávající, dojde k přizpůsobení vyrovnávacího zpoždění. V případě rozdílu těchto hodnot dojde k zahazení zprávy,
- **vypršení časovače TO1**, nachází-li se ONU ve stavu O4, dojde k vymazání ONU\_ID, ALLOC\_ID, OMCI, XGEM PORT\_ID a k návratu do stavu O2-3,
- **příjem přímé deaktivací zprávy ONU\_ID\_PLOAM**, nachází-li se ONU ve stavu O4, dojde k odstranění ONU\_ID, ALLOC\_ID, OMCI, XGEM PORT\_ID, burst profilu, zastavení časovače TO1 a návratu do stavu O1. Ve stavu O5 ONU dojde k vymazání ONU\_ID, všech ALLOC\_ID, OMCI, XGEM PORT\_ID, burst profilu, vyrovnávacího zpoždění a návratu do stavu O1,
- **příjem všesměrové deaktivací zprávy ONU\_ID\_PLOAM**, nachází-li se ONU ve stavu O2-3 dojde k odstranění burst profilu a návratu do stavu O1. Nachází-li se ONU ve stavu O4, dojde k odstranění ONU\_ID, ALLOC\_ID, OMCI, XGEM PORT\_ID, burst profilu, zastavení časovače TO1 a návratu do stavu O1. Ve stavu O5 ONU dojde k vymazání ONU-ID, všech ALLOC\_ID, OMCI, XGEM PORT\_ID, burst profilu, vyrovnávacího zpoždění a návratu do stavu O1,
- **příjem zablokování PLOAM, zablokování možností volby jedinečného sériového čísla**, nachází-li se ONU ve stavu O2-3 dojde k odstranění burst profilu a přechodu do stavu O7. Nachází-li se ONU ve stavu O4, dojde k zastavení časovače TO1 a přechodu do stavu O7. V případě působení ONU ve stavu O5 dojde k přechodu do stavu O7,
- **příjem zablokování PLOAM, zablokování všech voleb**, v tomto stavu dochází ke stejným operacím jako v předchozím bodě,
- **příjem zablokování PLOAM, povolení možností volby jedinečného sériového čísla**, nachází-li se ONU ve stavu O7, dojde k vymazání ONU\_ID, všech ALLOC\_ID, OMCI, XGEM PORT\_ID, burst profilu, vyrovnávacího zpoždění a k přechodu do stavu O1,
- **příjem zablokování PLOAM, povolení všech voleb**, v tomto stavu dochází ke stejným operacím jako v předchozím bodě,
- **vypršení časovače TO2**, nachází-li se ONU ve stavu O6, dojde k vymazání ONU\_ID, všech ALLOC\_ID, OMCI, XGEM PORT\_ID, burst profilu, vyrovnávacího zpoždění a k přechodu do stavu O1,
- **příjem grantu přenosového pásma s datovou alokací**, nachází-li se ONU ve stavu O4 obsahuje implicitní ALLOC\_ID a ignoruje datovou alokaci. Nachází-li se ve stavu O5, obsahuje implicitní případně explicitní ALLOC\_ID a dojde k předání burst,
- **příjem přímého PLOAM grantu**, nachází-li se ONU ve stavu O4 vyšle

registrační PLOAM zprávu. Nachází-li se ONU ve stavu O5 a PLOAM má zprávu k přenosu, vyšle ji. V opačném případě vyšle potvrzovací zprávu,

- **příjem žádosti o registraci PLOAM**, nachází-li se ONU ve stavu O5, odpovídá registrační PLOAM zprávou,
- **příjem přidělení ALLOC\_ID PLOAM**, nachází-li se ONU ve stavu O5, přizpůsobí ALLOC\_ID a odesílá potvrzovací zprávu,
- **příjem kontroly klíče PLOAM**, nachází-li se ONU ve stavu O5, zpráva je předána pro vnitřní řízení ONU,
- **příjem zprávy o povolení režimu spánku**, nachází-li se ONU ve stavu O5, zpráva je předána pro vnitřní řízení ONU.

## 5.5 Časování mezi OLT a ONU

Během procesu časování, je nutné dodržovat několik pravidel stanovených doporučením.

- Počátkem každého vysílaného respektive přijímaného PHY rámce je první bit PSync pole.
- Referenční hodnotou StartTime pro PHY burst je první vysílaný respektive přijímaný bit příslušného pole odpovídající alokační struktury šířky pásma. Jedná se o první bit XGTC burst záhlaví.
- Start vysílání PHY burst ve vzestupném směru je vymezen prvním bitem StartTime, pokud je tato hodnota v rámci specifikována. V opačném případě ji lze odvodit výpočtem.
- Velikost tichého okna na straně OLT je vymezena počátkem vysílání PHY rámce (který obsahuje serial number grant nebo ranging grant) a nejnižší možnou dobou zaslání prvního bitu PHY burst nesoucího odpověď PLOAM.
- Každý PHY burst je časově vyrovnáván při přechodu na OLT.  $T_{eqd}$  specifikuje uplynulý čas mezi počátky sousedních PHY rámců a je definován v BWmap.
- Distribuční síť je specifikována dvěma parametry udávanými v kilometrech. Jedná se o  $L_{min}$  minimální vzdálenost vlákna od OLT, a maximální diferenciální vzdálenost  $D_{max}$ . Pro ONU připojící se ve vzdálenosti  $L_i$  platí:

$$L_{min} \leq L_i \leq L_{min} + D_{max}. \quad (5.1)$$

Veškeré události ONU jednotek jsou určeny synchronizací pomocí PHY rámců přenášených v sestupném směru. ONU jednotkám jsou přiřazovány komunikační profily přenášené v BWmap spolu s hodnotami vyrovnávacího zpoždění a ostatních synchronizačních parametrů nezbytných pro správnou funkci XG-PON. Tyto parametry každá ONU obdrží při průchodu stavy popsány v kapitole 5.4. Uvádí se také

doba, během které musí každá ONU jednotka zpracovat příslušný PHY rámec včetně provedení FEC. Tato doba odezvy nesmí překročit hranici  $35 \pm 1 \mu s$ . Významným parametrem je také doba přenosu optického signálu mezi OLT a koncovými jednotkami v sestupném i vzestupném směru.

### 5.5.1 Časování při průchodu stavem O2-3

Během připojování ONU (jedné a více), je ve stavu Initial state O1 sestupným směrem přenášen PHY rámec obsahující shodné parametry PSync a SFC. Obdrželi-li ONU tyto parametry, přechází do stavu Serial\_Number state O2-3 a očekává rámec s přidělením serial number grant v sestupném směru. V této zprávě je obsažen komunikační burst profil pro vzestupný směr, který je nutné potvrdit zprávou Serial\_Number\_ONU PLOAM.

Při potvrzování nabízeného burst profilu více ONU, je nutné aplikovat náhodné zpoždění v rozsahu 0 až  $48 \mu s$ . Tím je docíleno snížení pravděpodobnosti vzniku kolize na straně OLT při zasílání odpovědi na příslušný burst profil. Využito je také tichého okna, při kterém je potlačena komunikace ve vzestupném směru, aby nedocházelo k vzniku dalších kolizí s PHY burst přenášenými ostatními ONU. Počátek tichého okna lze stanovit dle následujícího vzorce:

$$W_0^{SN} = RspTime_{min} + \frac{L_{min}(n_{1577} + n_{1270})}{c} + \frac{StartTime}{R_{nom}}, \quad (5.2)$$

závisí na minimální hodnotě doby odezvy ONU v XG-PON, na minimální době šíření optického signálu a na generované hodnotě StartTime. Minimální doba šíření signálu v XG-PON je závislá na hodnotách indexu lomu vláken použitých v sestupném a vzestupném směru. Hodnota  $c$  je rychlost světla v  $km/\mu s$  a  $R_{nom}$  je jmenovitá rychlost linky ve vzestupném směru udávaná v jednotkách  $slovo/\mu s$ .

Celkovou velikost tichého okna lze vypočítat dle vzorce:

$$W_{\Delta}^{SN} = RspTime_{var} + \frac{D_{max}(n_{1577} + n_{1270})}{c} + Rand_{max} + \frac{BurstSize}{R_{nom}}, \quad (5.3)$$

závisí na době odezvy připojující se ONU, na příslušné velikosti doby šíření signálu v sestupném i vzestupném směru. Dále je velikost tichého okna závislá na maximální hodnotě vkládaného zpoždění  $48 \mu s$  a velikosti přenášeného PHY burst.

Doba odezvy ONU ve stavu O2-3 je obvykle okolo  $0,3 \mu s$ . Tato hodnota je zanedbatelná ve srovnání s ostatními parametry ODN. Pro ODN o velikosti 20 km platí tyto parametry:

- rozdílná doba šíření optického signálu v obou přenosových směrech o velikosti  $200 \mu s$ ,

- rozdílná doba zpracování rámců koncovými jednotkami o velikosti  $2 \mu s$ ,
- $48 \mu s$  velikost vkládaného náhodného zpoždění sloužící pro zamezení kolizních stavů,
- velikost tichého okna se doporučuje  $250 \mu s$ .

Pro ODN o velikosti 40 km platí následující parametry:

- rozdílná doba šíření optického signálu v obou přenosových směrech o velikosti  $400 \mu s$ ,
- rozdílná doba zpracování rámců koncovými jednotkami o velikosti  $2 \mu s$ ,
- $48 \mu s$  velikost vkládaného náhodného zpoždění sloužící pro zamezení kolizních stavů,
- velikost tichého okna se doporučuje  $450 \mu s$ .

## 5.5.2 Časování při průchodu stavem O4

ONU vstupuje do stavu Ranging state O4 a očekává přidělení ONU-ID. Dochází k vymezení tichého okna, potlačí se na danou dobu komunikace ve vzestupném směru a ONU zasílá odpověď na přiřazené parametry OLT jednotkou. Počátek tichého okna lze vypočítat dle následujícího vzorce:

$$W_0^{RNG} = RspTime_{min} + \frac{L_{min}(n_{1577} + n_{1270})}{c} + \frac{StartTime}{R_{nom}}, \quad (5.4)$$

jehož velikost je shodná s  $W_0^{SN}$  ve stavu O2-3. Celkovou velikost tichého okna lze stanovit dle vzorce:

$$W_{\Delta}^{RNG} = RspTime_{var} + \frac{D_{max}(n_{1577} + n_{1270})}{c} + \frac{BurstSize}{R_{nom}}, \quad (5.5)$$

jehož velikost je oproti využití tichého okna ve stavu O2-3 snížena o velikost náhodného zpoždění  $48 \mu s$ , které není ve stavu O4 využito.

Doba odezvy ONU ve stavu O4 je okolo  $0,3 \mu s$ . Tato hodnota je stejně jako ve stavu O2-3 zanedbatelná ve srovnání s ostatními parametry ODN. Pro ODN o velikosti 20 km platí:

- rozdílná doba šíření optického signálu v obou přenosových směrech o velikosti  $200 \mu s$ ,
- rozdílná doba zpracování rámců koncovými jednotkami o velikosti  $2 \mu s$ ,
- velikost tichého okna se doporučuje  $202 \mu s$ .

Pro ODN o velikosti 40 km platí:

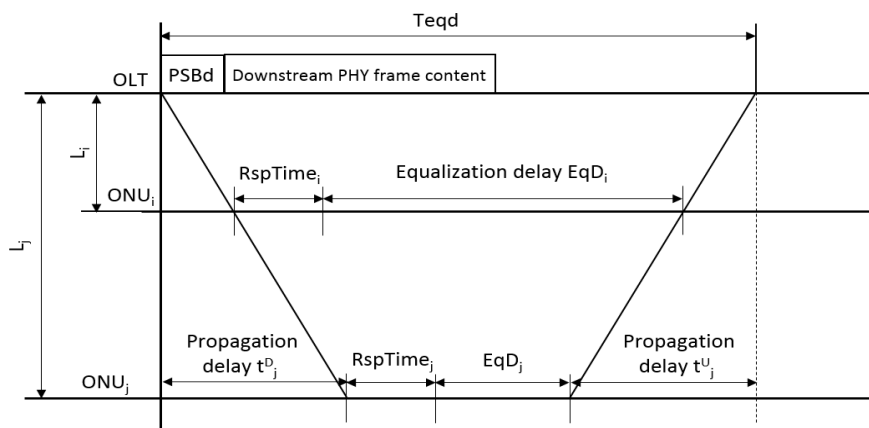
- rozdílná doba šíření optického signálu v obou přenosových směrech o velikosti  $400 \mu s$ ,
- rozdílná doba zpracování rámců koncovými jednotkami o velikosti  $2 \mu s$ ,
- velikost tichého okna se doporučuje  $402 \mu s$ .

## Výpočet vyrovnávacího zpoždění

Na základě fyzických parametrů PON, stanoví vždy OLT hodnotu  $T_{eqd}$ , která zůstává neměnná. Jedná se o proměnnou vyjadřující maximální dobu mezi vysláním PHY rámce a přijetím PHY burst od nejvzdálenější ONU (hodnota  $ONU_{max}$  může být pouze teoreticky stanovena a nesmí být při realizaci překročena). Velikost  $T_{eqd}$  lze stanovit dle vzorce:

$$T_{eqd} \geq RspTime_{max} + (L_{min} + D_{max}) \cdot \frac{n_{1577} + n_{1270}}{c}. \quad (5.6)$$

Pokud OLT vysílá ve stavu O4 synchronizační rámec v sestupném směru, měří dobu  $\Delta_{iRNG}$  mezi vysláním PHY rámce a obdržetím příslušného navazujícího PHY burst. Na základě znalosti  $\Delta_{iRNG}$ , lze stanovit vyrovnávací zpoždění  $EqD_i$  (Equalization Delay) příslušné  $ONU_i$ , jehož hodnota závisí na umístění (vzdálenosti mezi OLT a ONU) v PON.



Obr. 5.18: Výpočet vyrovnávacího zpoždění.

V případě znalosti  $\Delta_{iRNG}$ , vypočítáme  $EqD_i$  dle vzorce:

$$EqD_i = T_{eqd} - \left( \Delta_{iRNG} - \frac{StartTime}{R_{nom}} \right), \quad (5.7)$$

známe-li podrobně topologii PON, zejména vzdálenosti mezi OLT a ONU, lze vypočítat  $EqD_i$  dle vzorce:

$$EqD_i = T_{eqd} - (RTD_i + RspTime_i), \quad (5.8)$$

kde  $RTD_i$  (Round-Trip Delay) je doba šíření optického signálu mezi OLT a  $ONU_i$  v obou přenosových směrech a lze ji vypočítat podle vzorce:

$$RTD_i = t_i^D + t_i^U = (n_{1270} + n_{1577}) \cdot \frac{L_i}{c}. \quad (5.9)$$

## Úpravy vyrovnávacího zpoždění během komunikace

Systém synchronizace ONU jednotek ze signálu přenášeného sestupným směrem od OLT vyžaduje přesnost v jednotkách  $\mu\text{s}$ . Vlivem rozdílných teplot působících na ODN, OLT a koncové jednotky, případně vlivem stárí PON a díky dalším faktorům negativně ovlivňujícím přenos optického signálu, může docházet ke změnám velikostí doby přenosu signálu mezi OLT a ONU. Během provozu tak není nutné přiřazovat koncové jednotce nové parametry (nemusí se opětovně synchronizovat), ale dochází k drobným korekcím parametrů za provozu. Pokud PHY burst přichází na OLT v rozdílném čase oproti hodnotě stanovené při synchronizaci, změnou  $EqD$  uvedenou ve zprávě Ranging\_Time PLOAM dochází k vyrovnání zpoždění.

Pro zabránění častých korekcí, OLT udržuje pro každou ONU dvě prahové hodnoty vyrovnávacího zpoždění. Nižší hranicí je bezpečná hranice, ve které není nutné provádět jakékoliv změny parametrů. Při překročení minimální dovolené meze, musí OLT přepočítat nové vyrovnávacího zpoždění a předat tuto informaci ONU pomocí Ranging\_Time PLOAM zprávy. OLT tedy pracuje s hodnotou  $DOW_i$  (Drift of Window). Horní mezní práh je druhým parametrem, při jehož překročení může dojít k ovlivnění komunikačních intervalů ostatních ONU. Nastane-li situace, kdy úprava vyrovnávacího zpoždění přesahuje horní mez (tato situace by v PON neměla nastat vlivem úprav vyrovnávacího zpoždění), OLT vysílá varování o rušení přenosu  $TIW_i$  (Transmission Interface Warning). Toto opatření může obsahovat zablokování ONU, která přesáhla horní dovolenou mez, případně její deaktivaci nebo provedení podrobné diagnostiky problému. Prahové hodnoty, navrhované v ITU-T, jsou stanoveny pro dolní mez  $\pm 8$  bit a pro horní mez  $\pm 16$  bit.

## 5.6 FEC v XG-PON

XGTC PHY adaptační podvrstva zahrnuje možnost využití FEC, tedy zavedení redundance datových bloků za účelem detekcí a oprav chyb v přenosu dat. Ve standardu XG-PON je FEC řešeno využitím Reed-Solomon (RS) kódování.

RS pracuje na úrovni bajtů a patří do rodiny symetrických lineárních cyklických kódů. Jedná se o vytváření datových bloků konstantních velikostí, na jejichž konec je přidána parita. Tyto kombinace dat a parity tedy vytváří kódová slova. Díky takto přidané paritě, je FEC schopen kontrolovat datový tok a detekovat případně opravovat chyby. Dochází tedy k obnovení původních datových bloků v případech objevujících se chyb při přenosu.

Mezi často využívané RS kódy patří [11]:

- RS(255, 239) – obsahuje kódové slovo o velikosti 255 bajtů složené z datové části 239 bajtů a 16 bajtů tvoří paritu,

- RS(255, 223) – obsahuje kódové slovo o velikosti 255 bajtů složené z datové části 223 bajtů a 32 bajtů tvoří paritu.

XG-PON využívá FEC ve zkrácené, případně redukované podobě. Zkrácené kódové slovo o 248 symbolech je na kodéru vyplněno o 7 počátečních nul, které nejsou přenášeny, ale na straně přijímače opětovně vloženy do zkráceného kódového slova před dekódováním.

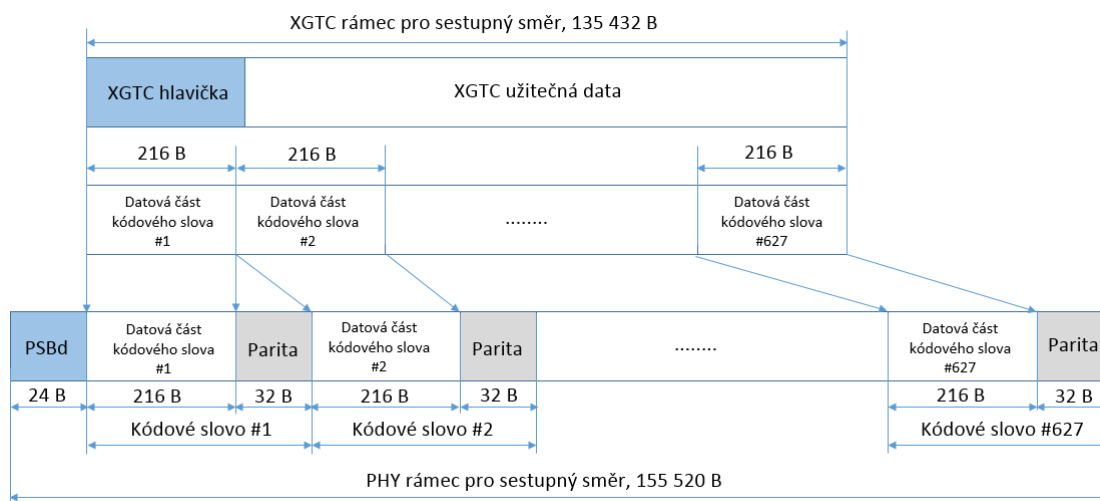
RS kódy používané v XG-PON jsou [11]:

- RS(248, 216) – jedná se o zkrácenou formu RS(255, 223) použitou v sestupném směru přenosu,
- RS(248, 232) – jedná se o zkrácenou formu RS(255, 239) použitou ve vzestupném směru přenosu.

Pro podstatu pochopení sestavování PHY rámců v obou přenosových směrech bude nyní vysvětlen princip vkládání parity, a tedy nasazení FEC v XGTC PHY adaptační podvrstvě. Detailní rozbor FEC, v našem případě RS kódování, je nad rámec tohoto textu a nebude mu věnována další pozornost mimo popis nasazení FEC v obou přenosových směrech.

### 5.6.1 FEC v sestupném směru

Jak již bylo zmíněno, pro sestupný směr bylo zvoleno kódování RS(248, 216). Každý PHY rámec obsahuje 627 FEC kódových slov o velikosti 248 bajtů složených vždy z 216 bajtů datové části a k nim příslušných parit o velikosti vždy 32 bajtů. Proces sestavení PHY rámce pro přenos v sestupném směru je zobrazen na obr. 5.19.



Obr. 5.19: Vkládání FEC parity a tvorba PHY rámce pro sestupný směr [11].

PSBd hlavička není součástí FEC kódování a prvních 24 bajtů je tedy přenášeno v surovém stavu (bez kódování). První kódové slovo začíná tedy od 25. bajtu PHY rámce (což odpovídá prvnímu bajtu XGTC záhlaví). Je tedy patrné že do kódování je zapojen celý XGTC rámec mimo PSBd hlavičku příslušnou danému PHY rámci.

V případě dekódování PHY rámce (přenášeného sestupným směrem) ONU jednotkou, je tento proces prakticky zrcadlově otočen. Dojde k přijetí PHY rámce, jehož užitečná část se rozdělí na 627 kódových slov. U každého kódového slova je pomocí parity kontrolována správnost přeneseného obsahu, případné chyby jsou opraveny a je sestaven XGTC rámec o velikosti 135 432 bajtů.

## 5.6.2 FEC ve vzestupném směru

Obdobně pro vzestupný směr bylo zvoleno kódování RS(248, 232). FEC kódové slovo o velikosti 248 bajtů je složeno vždy z 232 bajtů datové části a k nim příslušné parity o konstantní velikosti 16 bajtů. PSBu hlavička není součástí FEC kódování. První kódové slovo PHY burst tedy začíná XGTC hlavičkou. Všechny alokační struktury příslušné ONU jednotce jsou kódovány stejnou technikou FEC. Celý blok XGTC burst je brán jako souvislé pole dat, které se rozkládá na velikost příslušnou danému FEC kódování (v našem případě bloky o velikosti 232 bajtů). Vzhledem k proměnné velikosti XGTC burst může nastat situace kdy nedojde k rovnoměrnému rozložení na stejně velké datové bloky kódových slov, ale nejvýše jeden tento blok bude mít zkrácenou velikost (vždy poslední blok dat pro kódová slova z XGTC burst).

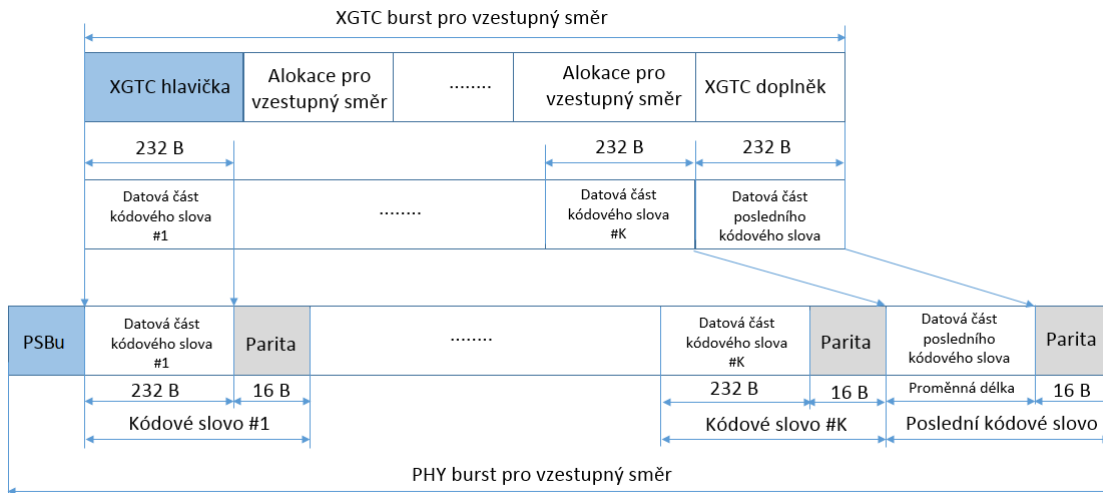
Vždy když bude mít poslední vytvářené kódové slovo nižší velikost než-li fixních 232 bajtů, FEC kodér vytváří zkrácené kódové slovo takto [11]:

- Extra nulové bajty se přidají na začátek posledního kódového slova, aby jeho výsledná velikost byla 232 bajtů.
- Vypočítá se parita kódového slova.
- Přidané bajty jsou odstraněny a zkrácené kódové slovo odesláno.

Na straně OLT, tedy na straně dekodéru dojde k následujícím krokům pro dekódování zkráceného kódového slova [11]:

- Extra nulové bajty se přidají na začátek posledního kódového slova, aby jeho výsledná velikost byla 232 bajtů.
- Po procesu dekódování a ověření správnosti jsou tyto bajty opět smazány.

V místě dekodéru, tedy na straně příjmu sestavených PHY burst obsahujících FEC kódování, je celý model prakticky zrcadlově otočen. PSBu hlavička je neměnná (není kódována) a celé užitečné zatížení PHY burst je rozloženo do 232 bajtů velkých kódových slov (mimo poslední kódové slovo jehož délka je proměnná). Dle parit jsou tyto kódová slova kontrolována a je z nich sestaven XGTC burst.



Obr. 5.20: Vkládání FEC parity a tvorba PHY burst pro vzestupný směr [11].

### Vypnutí FEC ve vzestupném směru

PSBu obsahuje vždy preambuli konkrétní hodnoty, které přísluší vymezovač velikosti 32 případně 64 bitů. Dle velikosti vymezovače, lze také určit, zda bude ve vzestupném směru použito FEC či nikoliv. Doporučené hodnoty jsou uvedeny v tab. 5.6

Tab. 5.6: Doporučené hodnoty preambule a vymezovače [11].

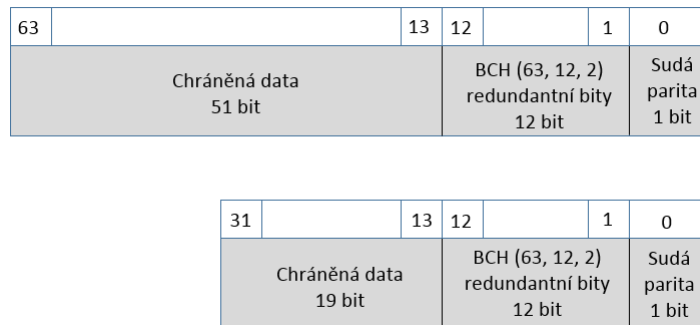
Preambule	32bit vymezovač	64bit vymezovač
0x BB52 1E26	0x A376 70C9 0x 4BDE 1B90 (FEC zapnuto) 0x A376 70C9(FEC vypnuto)	0x B9D4 3E68 462B C197 0x B9D4 3E68 462B C197 (FEC zapnuto) 0x B752 1F06 48AD E879(FEC vypnuto)
0x AAAA AAAA	0x AD4C C30F 0x A566 79E0 (FEC zapnuto) 0x AD4C C30F (FEC vypnuto)	0x B3BD D310 B2C5 0FA1 0x B3BD D310 B2C5 0FA1 (FEC zapnuto) 0x CE99 CE5E 5028 B41F(FEC vypnuto)

OLT disponuje dynamickou funkcí zapnutí případně vypnutí FEC ve vzestupném směru, v závislosti na vyhodnocení chybovosti pro danou ONU. Toto vyhodnocení bere v úvahu samotnou hodnotu bitové chybovosti spolu s požadavky dané ONU (požadavky na propustnost a mezní hodnotu bitové chybovosti). Pokud je bitová

chybovost deaktivována, lze ji i tak počítat pomocí BIP-32 (Bit Interleaved Parity) v XGTC doplňku.

## 5.7 HEC v XG-PON

Ve standardu XG-PON se během sestavení PHY rámce případně PHY burst vyskytuje hybridní korekce chyb (HEC). V XGTC záhlaví se používá k ochraně 19bit pole a vytváří celkovou 32bit strukturu. V BWmap se používá u XGEM, kde chrání 51bit pole a vytváří celkovou strukturu 64bit. Pro účely výpočtu chráněného pole o 19bit velikosti se HEC vypočítá ze struktury 32 nulových bitů přidaných právě k 19bit u kterých se HEC sestavuje (vznikne tak 51bit struktura, ze které je vypočítáno HEC a přidané nulové bity jsou opět smazány a nejsou součástí přenosu).



Obr. 5.21: HEC struktura používaná XG-PON [11].

HEC disponuje dvojnásobnou opravou a trojnásobnou detekcí chyb. Skládá se těchto částí [11]:

- BCH(63, 12, 2) – tento kód je aplikován na chráněnou 51bit oblast a využívá se zde generátoru polynomu. Každá vyskytující se samostatná nebo dvojnásobná chyba má unikátní 12bit dlouhý syndrom, dle kterého lze všechny tyto chyby opravit. Za pomoci parity a dalších vlastností BCH lze opravit i trojnásobné chyby.
- Sudá parita – celkový počet logických jedniček v oblasti chráněných dat a HEC musí být sudý. BCH neobsahuje paritu ve svém výpočtu, naopak parita je sestavena také z vypočteného BCH. Parita udává, zda došlo k chybě v hlavičce (za předpokladu lichého počtu chyb).

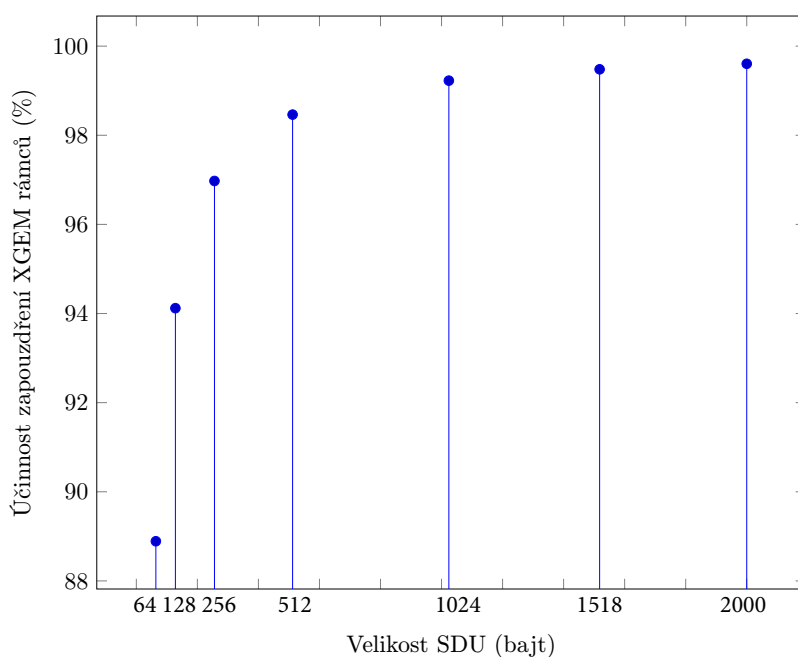
Detailnější popis včetně počítání s polynomem případně již zmiňované 12bit syndromy, jsou nad rámec tohoto textu a nebude jim věnována další pozornost.

## 6 REALIZACE V MATLABU

Řada simulačních nástrojů se zaměřuje na specifickou vrstvu, a to zpravidla na vrstvu fyzickou. Je to dáno tím, že simulační programy nezvládají vyšší vrstvy, neboť je nezbytné je naprogramovat nezávisle na nově vznikajících standardech. V tomto případě je práce směřována na chování přenosové vrstvy XG-PON, zajišťující zpracování datových bloků do struktur vhodně sestavených pro přenos.

### 6.1 Zapouzdření SDU v XG-PON

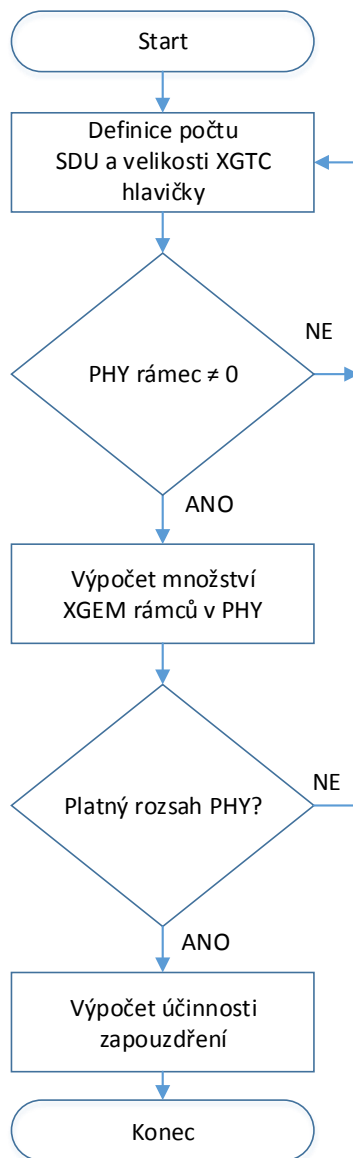
Jedním z prvních kroků při přenosu datových bloků je zpracování SDU do XGEM rámců v sestupném směru. Každé SDU, případně SDU fragment je přenesen v průběhu zapouzdření do XGEM užitečného datového pole. Každé užitečné datové pole je opatřeno 8 B hlavičkou, což vnáší do procesu zapouzdření jistou míru nadbytečnosti neužitečných dat. Z principu je patrné, že nejvhodnějším řešením je využívat co možná nejvyšších velikostí SDU. Tato myšlenka je ověřena na obr. 6.1.



Obr. 6.1: Závislost účinnosti XGEM zapouzdření na velikosti SDU.

Pokud by byla aplikována velikost SDU 64 bajtů, lze dosáhnout účinnosti téměř 88,9%. V případě použití standardní velikosti ethernetového rámce 1 518 bajtů, bylo dosaženo vyšší účinnosti, konkrétně navýšení činilo 10%.

Demonstrativní výpočet účinnosti zapouzdření SDU, byl proveden za předpokladu použití minimální velikosti XGTC hlavičky. Velikost XGTC užitečného datového pole tedy zůstala neměnná po dobu simulace, viz vývojový diagram na obr. 6.2.



Obr. 6.2: Vývojový diagram pro výpočet účinnosti zapouzdření SDU rozdílných velikostí.

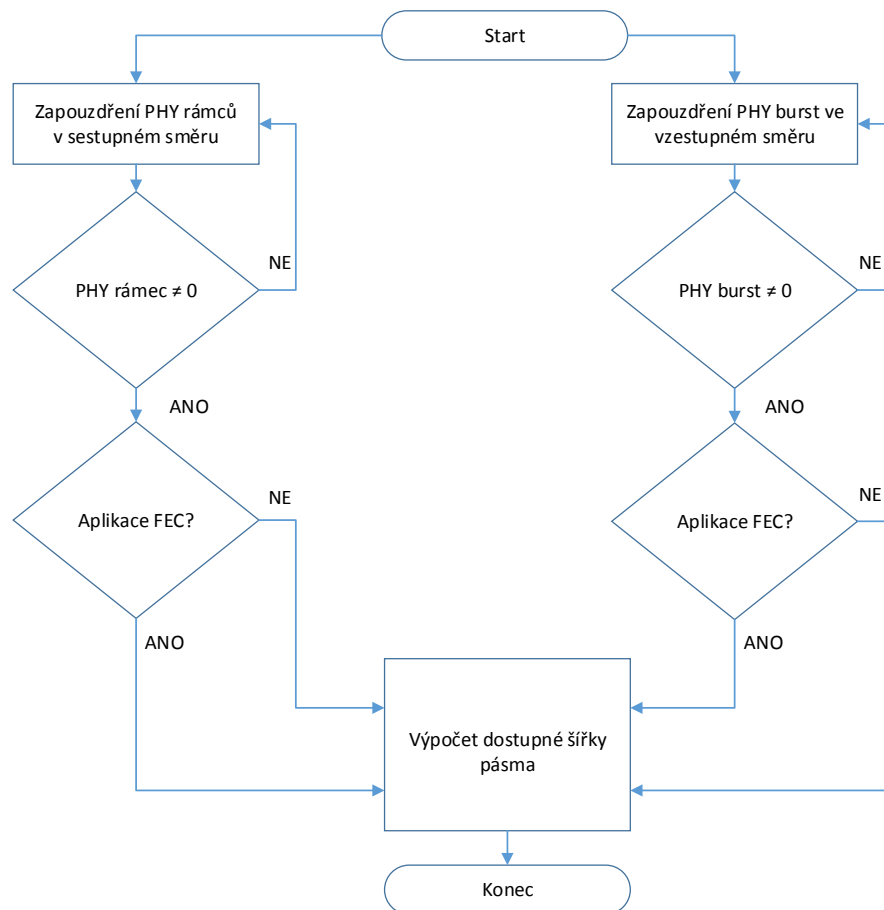
Vzhledem k literatuře [23] zabývající se porovnáním standardů GPON a XGPON bylo dosaženo shodných výsledků. Lze tedy předpokládat jejich správnost. Na základě tohoto poznatku lze definovat první z předpokladů pro vytvoření co nejefektivněji pracující PON sítě.

## 6.2 Vliv FEC na dostupnou šířku pásma

XG-PON disponuje FEC v obou přenosových směrech. Vzhledem k rozkladu XGTC rámce případně XGTC burst na kódová slova, která jsou opatřena příslušnou paritou, je do systému vnášena nezanedbatelná nadbytečnost vlivem těchto paritních dat.

V případě 100% využití sdíleného média na ODN (tedy přenos 10 Gbit/s sestupným směrem a 2,5 Gbit/s vzestupným směrem), kdy jsou všechna okna délky  $125 \mu\text{s}$  vyplněna příslušnými rámci, lze vypočítat dostupné velikosti šířek pásma (při aktivním FEC). Dostupnou velikostí šířky pásma, je myšlena oblast využití pro nadřazené podvrstvy PHY adaptační podvrstvě.

Za předpokladů definovaných výše a při dodržení velikostí rámců dle [11] byl sestaven vývojový diagram na obr. 6.3 pro výpočet vlivu FEC na dostupnou šířku pásma pro přenos v sestupném a vzestupném směru.

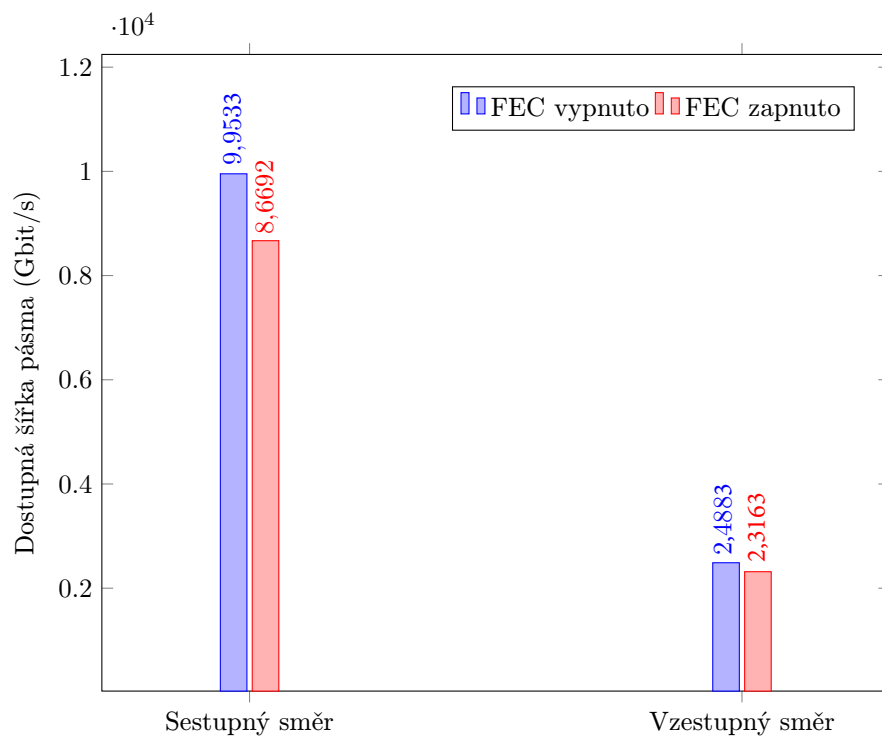


Obr. 6.3: Vývojový diagram pro výpočet dostupné šířky pásma v závislosti na použití FEC.

Výsledky, kterých bylo dosaženo jsou shrnuty v tab. 6.1, případně v grafické podobě viz obr. 6.4.

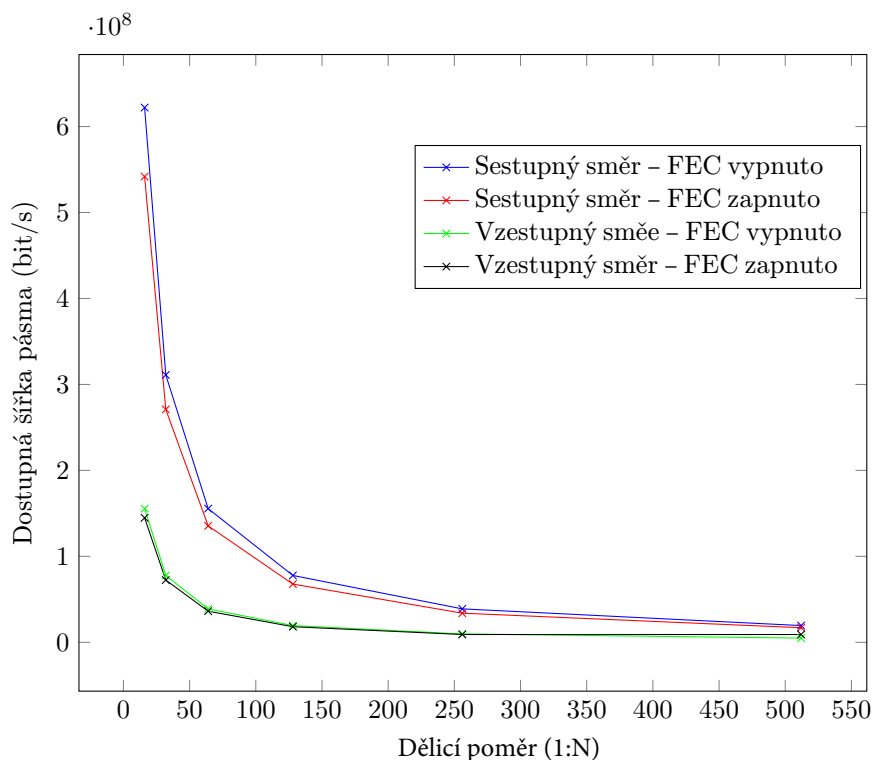
Tab. 6.1: Vliv FEC na dostupnou šířku pásma.

Směr přenosu	Přenosová rychlost [Mbit/s]	Dostupná šířka pásma s využitím FEC [Mbit/s]	Rozdíl [Mbit/s]
Sestupný	9 953,28	8 669,20	1 284,08
Vzestupný	2 488,32	2 316,30	172,02



Obr. 6.4: Porovnání dostupné šířky pásma u sestupného a vzestupného směru při zapnutém a vypnutém FEC.

Vliv FEC na celkovou dostupnou šířku pásma lze také vyjádřit vzhledem k dělicímu poměru. Pro tento případ byl zvolen idealizovaný model, který dostupnou šířku pásma rovnoměrně rozděljuje dle počtu ONU jednotek (každá ONU má vyhrazenou stejnou šířku pásma). V praxi se využívá dynamického přidělování šířky pásma, který v tomto výstupu není zahrnut. Závislost dostupné šířky pásma na počtu ONU jednotek (rovnoměrné idealizované rozložení) při zapnutém případně vypnutém FEC je znázorněna na obr. 6.5.



Obr. 6.5: Závislost dostupné šířky pásma na počtu ONU jednotek při zapnutém a vypnutém FEC.

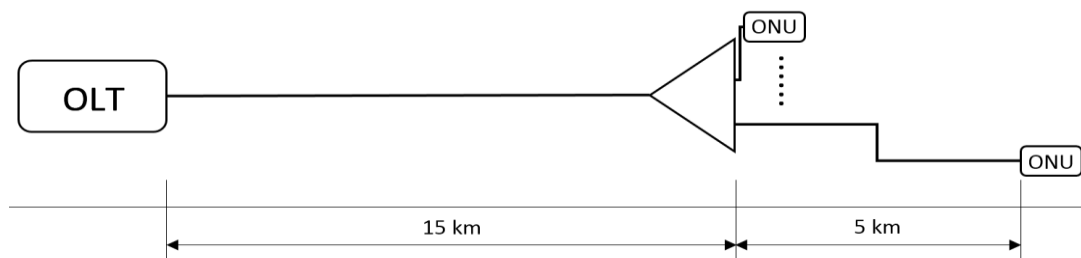
Při nasazení FEC v XG-PON je velkou výhodou jeho schopnost zlepšení bitové chybovosti o několik řádů (v závislosti na délce ODN). Velkou nevýhodou je ovšem skutečnost, že jeho vlivem (vlivem parity) výrazně naroste poměr neužitečných dat. V případě sestupného směru se jedná o 1 284,08 Gbit/s při 100 % využití šířky pásma, v případě vzestupného směru jde o 172,02 Mbit/s.

Tato problematika je rovněž rozebrána v literatuře [5] a v případě sestupného směru bylo dosaženo stejných výsledků. U vzestupného směru se výsledky liší. Vzhledem k nevedenému výpočtu ovšem nelze zjistit, jeho správnost. V případě porovnání těchto výsledků u vzestupného směru, lze s jistotou říci že rozdíl přenosové šířky pásma vzhledem k dostupné šířce pásma je vyšší než 160 Mbit/s.

### 6.3 Simulace časování mezi OLT a ONU

Topologie, implementovaná do simulačního programu Matlab, obsahuje jednu centrální jednotku OLT. OLT jednotka společně propojená s pasivním optickým rozbočovačem, vymezují ODN o délce  $L_{min} = 15$  km. V rámci PON je využito jednovodičové optické vlákno SMF (Single-mode Optical Fiber) [2] o hodnotách indexu

lomu pro vzestupný směr  $n_{1310} = 1,451$  a pro sestupný směr  $n_{1550} = 1,448$ . Maximální diferenciální vzdálenost ONU je stanovena na  $D_{max} = 5$  km. ONU jednotky jsou generovány vždy ve vzdálenostech  $L_i$  a je splněná podmínka definovaná vzorcem 5.1. Pasivní optický rozbočovač disponuje parametry umožňujícími maximální dělicí poměr 1:256. Z hlediska fyzické vrstvy musí být splněn příslušný útlumový plán specifikovaný útlumovou třídou v literatuře [10].



Obr. 6.6: Topologie XG-PON sestavená v prostředí Matlab [16].

Simulační model, generující 256 ONU jednotek náhodně rozmístěných ve vzdálenostech  $L_i$ , řeší zejména tyto problematiky související s časováním v XG-PON:

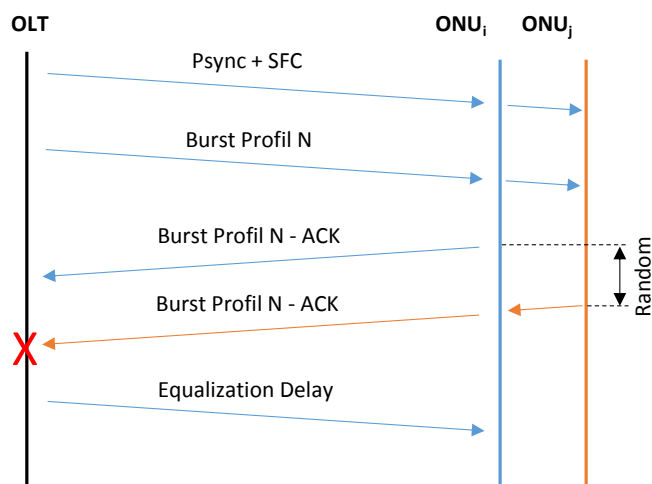
- kolizní stavy vznikající při průchodu koncových jednotek provozními stavy,
- výpočet vyrovnávacího zpoždění,
- vliv indexu lomu na časování,
- připojování koncových jednotek.

### 6.3.1 Připojování ONU do PON

Existuje-li v síti jedna, případně více koncových jednotek, které žádají v daný okamžik o zařazení do PON, dochází k paralelnímu potvrzení konkrétního burst profilu od všech připojujících se koncových jednotek. Vzhledem k možnosti vzniku kolizí na straně OLT při potvrzování příslušných burst profilů je vkládáno náhodné zpoždění  $0-48 \mu s$  ONU jednotkami. Tím dochází v daném časovém okamžiku k přijetí burst profilu od ONU jednotky, jejíž odpověď dorazí jako první k OLT. Všechny ONU jednotky navíc musí být schopny reagovat na příchozí zprávy nejpozději do  $RespTime_{max} = 35 \pm 1 \mu s$ . Hodnota  $RespTime$  je pevně stanovena standardem [11].

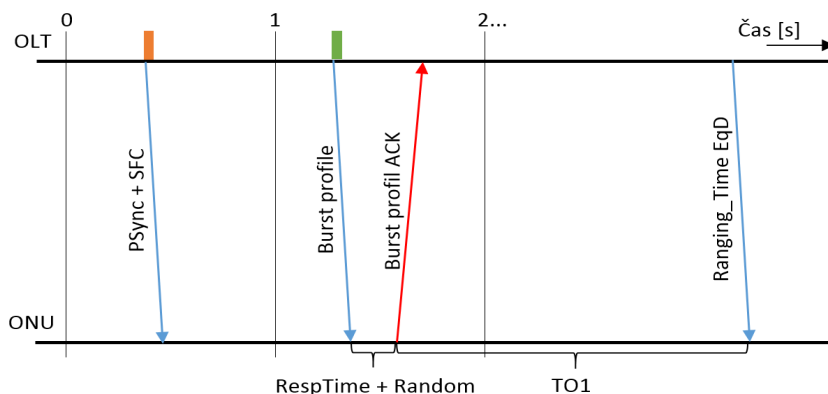
V praxi může díky rozložení PON sítě nastat situace, kdy dojde k odpojení většího množství ONU jednotek. Například díky výpadku zdroje energie v dané lokalitě. Jelikož tyto jednotky ztratí synchronizaci v sestupném směru LODS, připojují se opětovně ve stavu Initial State O1. Nachází-li se na PON v jednom časovém okamžiku 2 koncové jednotky čekající na přiřazení, obdrží postupně PSync, SFC a burst profil pomocí všesměrových zpráv šířených vždy jednou za jednotku času.

OLT tedy postupně přichází potvrzení burst profilu od těchto jednotek a vybrána je vždy ONU jednotka jejíž PSBu přichází k OLT jako první. Jedná se o jednotku s nejnižšími parametry  $RTD_i$  a Random, kde  $RTD_i$  je doba šíření signálu mezi OLT a ONU. Vypočteme ji dle vzorce 5.9. Výše popsany aktivací proces je zobrazen na obr. 6.7.



Obr. 6.7: Aktivační proces dvou ONU připojujících se do PON.

Do stavu Ranging State O4 přechází pouze jednotka jejíž PSBu dorazilo k OLT jako první. Současně na straně OLT nesmí dojít ke kolizi s ostatními přijatými rámci ve vzestupném směru. ONU jednotky, které také reagovaly na nabízený burst profil, musí opětovně čekat na synchronizaci ve vzestupném směru a celý proces opakují. Z pohledu ONU, která je zařazena do komunikace, lze demonstrovat aktivací proces na obr. 6.8.

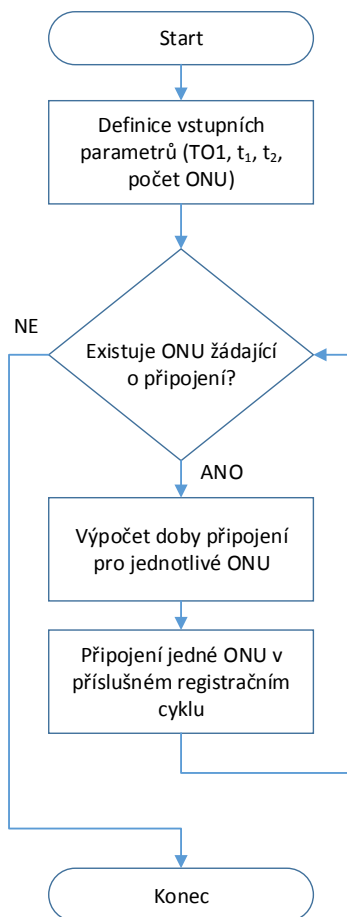


Obr. 6.8: Časový diagram připojení ONU jednotky do PON [16].

## Případová studie současného připojení 256 ONU

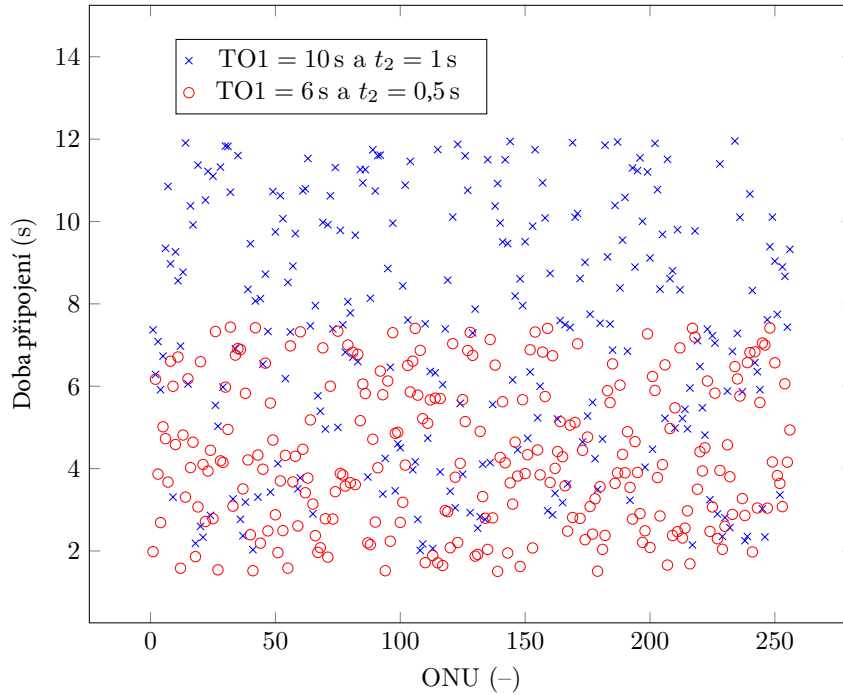
V počátečním stavu jsou ONU jednotky zapnuty, respektive uvedeny do stavu Initial State O1 a synchronizují se pomocí PHY rámců přenášených v sestupném směru. PSBd hlavička obsahující PSync a SFC pole je vysílána OLT jednotkou vždy jednou za  $t_1 = 1$  s. Příslušné burst profily nabízené připojujícím se ONU jednotkám, vysílá OLT v intervalech  $t_2$ . Časovač udržující ONU jednotky ve stavu O4, je nastaven na hodnotu TO1. V každém registračním cyklu dojde k připojení pouze jedné koncové jednotky. Ostatní jednotky, které potvrdily nabízený burst profil, čekají ve stavu O4 na vypršení časovače TO1. Po jeho vypršení přechází do stavu O1, kde celý cyklus opakují.

Minimální doby připojení jednotlivých ONU lze stanovit na základě znalosti velikosti: intervalů zasilání burst profilů  $t_2$ , hodnoty časovače TO1 a parametrech vyplývajících z topologie PON (hodnoty:  $RTD_i$ ,  $Random_i$  a  $RespTime_i$ ).



Obr. 6.9: Vývojový diagram pro výpočet dílčí a celkové doby připojení jednotlivých ONU.

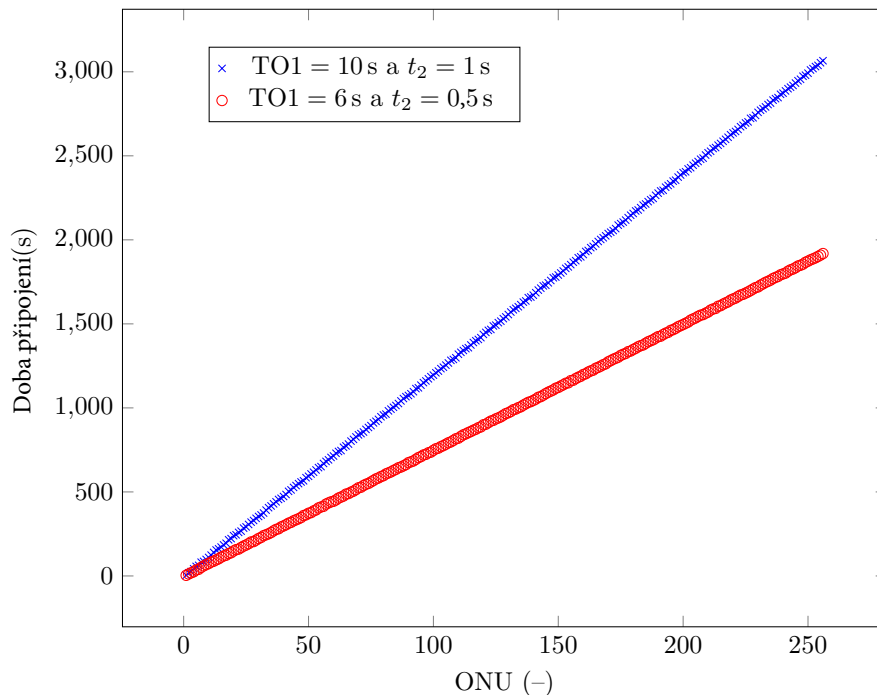
Graf uvedený na 6.10 reprezentuje časy připojení jednotlivých ONU jednotek v počátečním cyklu simulace, kdy o připojení současně žádá 256 ONU. Po úpravě parametrů  $TO1$  a  $t_2$ , lze získat výrazně nižší rozsah časů připojení jednotlivých ONU. Významnou roli ve snížení času připojení hraje časovač  $TO1$ .



Obr. 6.10: Doby připojení jednotlivých ONU během jednoho registračního cyklu.

Pokud dojde k připojení jedné z 256 ONU v každém registračním cyklu, celkový čas připojení zobrazuje 6.11. U základního nastavení dosahuje čas připojení poslední ONU  $t_{256} = 51\text{ min}$ . Úpravou parametrů  $TO1$  a  $t_2$  by bylo možné snížit čas připojení až o 19 minut [16].

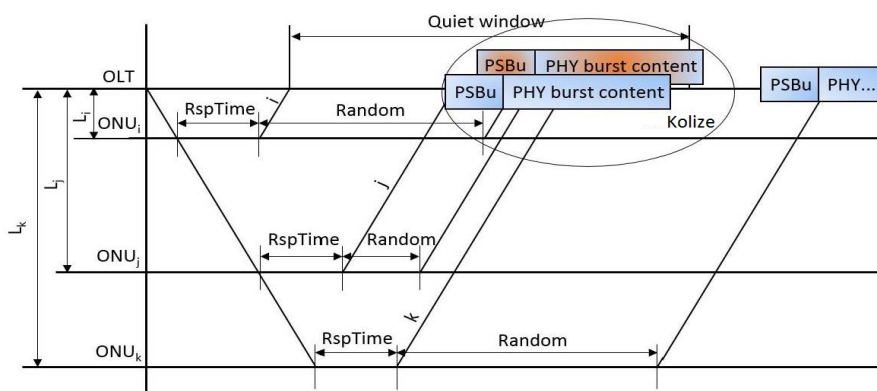
Tento simulační model vychází z předpokladu, že v každém registračním cyklu je OLT jednotkou nabízen jeden burst profil. Na tento burst profil reagují všechny připojující se ONU a v jednom registračním cyklu dojde k připojení pouze jedné z nich.



Obr. 6.11: Potřebný čas pro připojení 256 ONU jednotek do PON.

### 6.3.2 Vznik kolizních stavů

Při připojování ONU jednotek do PON je díky přidávání náhodného zpoždění o délce 0–48  $\mu\text{s}$  zabráněno kolizím, což je patrné z obrázku 6.12 a rovněž uvedeno v literatuře [5].

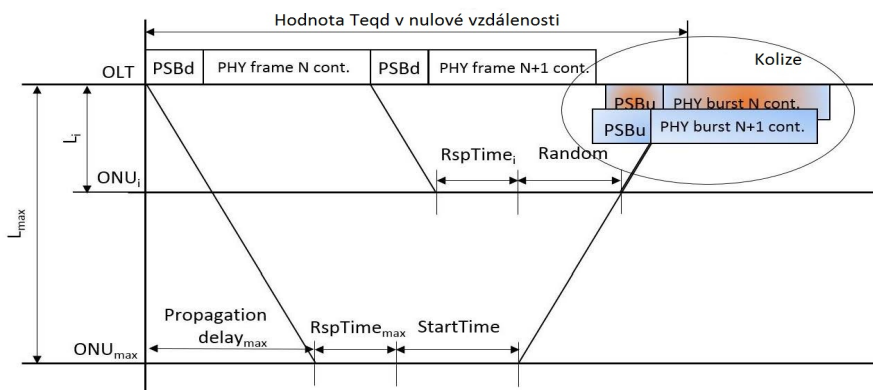


Obr. 6.12: Přidávání náhodného zpoždění registrujícím se ONU.

Tento systém vkládání náhodného zpoždění ovšem není zcela účinný. Nelze plně zabránit kolizím vzhledem k rozdílné době šíření signálu optickým vláknem. Nachází-

li se v PON  $ONU_i$  ve vzdálenosti  $L_i$  a  $ONU_j$  ve vzdálenosti  $L_j$  od OLT, lze vložím Random o délce 0–48  $\mu s$  naopak kolizi způsobit. Pravděpodobnost vzniku kolize tohoto typu se zvyšuje s počtem jednotek připojujících se současně do PON.

Druhý případ možného vzniku kolize je reprezentován vysílací OLT jednotkou, která vysílá v sestupném směru nejvzdálenější jednotce  $ONU_{max}$  rámeček N.  $ONU_{max}$  se nachází ve vzdálenosti  $L_{max} = 19,9974$  km. O 125  $\mu s$  později vysílá rámeček N+1 směrem k  $ONU_i$  nacházející se ve vzdálenosti  $L_i = 15,0017$  km. Tato situace je znázorněna na obrázku 6.13.



Obr. 6.13: Druhý případ vzniku kolize.

V rámci N jsou zasílány informace o hodnotě vyrovnávacího zpoždění s platnou hodnotou  $StartTime = 77 \mu s$ , což odpovídá hodnotě slova 5989 v příslušném poli.  $ONU_{max}$  je ve stavu Ranging State O4 a na příchozí rámeček N odpovídá s již přidělenou hodnotou  $StartTime$ . V následujícím rámci N+1 je vyslána všesměrová zpráva obsahující nabízený burst profil. Burst profil slouží pro zařazení nově čekající ONU jednotky. Na tuto zprávu reaguje  $ONU_i$ , která již v předchozím rámci obdržela platnou hodnotu  $Psync$  a  $SFC$ . Odpověď  $ONU_i$  je zpožděna o náhodné zpoždění Random o délce 0–48  $\mu s$ . Hodnotu Random volí náhodně příslušná ONU. OLT obdrží odpověď na rámeček N i na rámeček N+1 v časovém rozestupu blízkém se nule. Tento stav je vyhodnocen jako kolize a informace šířené ve vstředném směru jsou zahozeny OLT jednotkou.

V závislosti na možném vzniku kolize zobrazené na obr. 6.13, je zavedena aplikace tichého okna (Quiet Window). Jeho velikost je závislá na vzdálenosti  $ONU_{max}$  a na stavu ve kterém se ONU nachází. Jeho velikost je definována v kapitole 5.5, případně v literatuře [11]. Během doby platné pro tiché okno je přerušena veškerá komunikace vstředným směrem v PON. Během této bezpečné meze lze provádět připojování čekajících ONU, aniž by došlo ke kolizi tohoto typu.

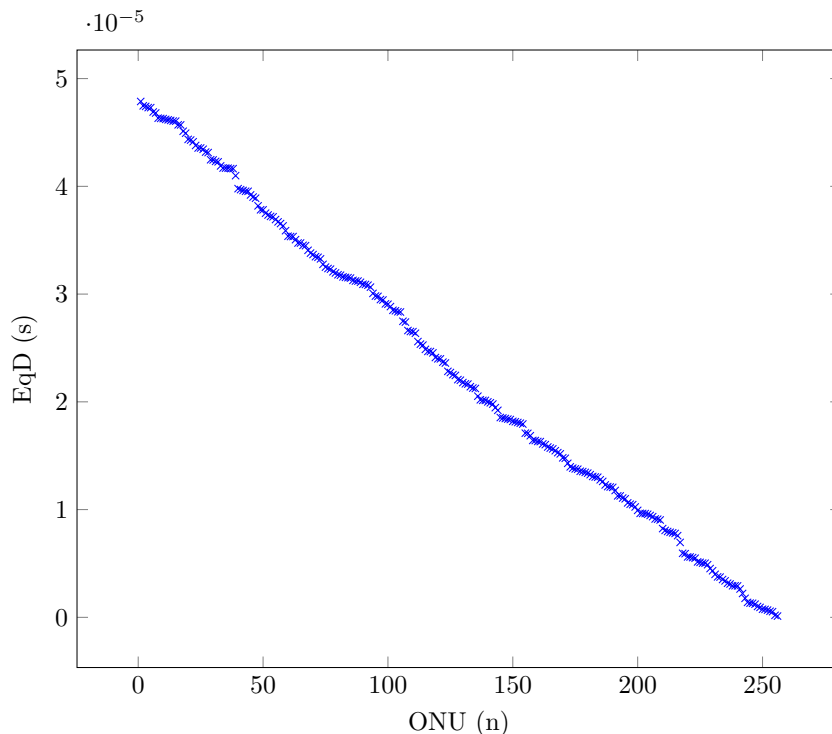
### 6.3.3 Vyrovnávání časování u ONU

Pokud je ONU jednotkou správně potvrzen příslušný burst profil ve stavu Serial\_Number State O2-3, plynule se přechází do Ranging State O4, kdy se očekává přidělení vyrovnávacího zpoždění OLT jednotkou, respektive v tomto případě vyčítání vyrovnávacího zpoždění z kompletní znalosti topologie sítě. Zde hraje roli zejména hraniční vzdálenost ONU. Pod pojmem hraniční ONU si představíme teoreticky nejvzdálenější ONU jednotku od OLT. Z obr. 6.6 vyplývá, že jde o  $L_{max}=20$  km.

Vyrovnávací zpoždění pro libovolnou  $ONU_i$  je možné vypočítat ze znalosti doby šíření v sestupném a vzestupném směru mezi OLT a  $ONU_i$  dle vztahu 5.8, kde  $T_{eqd}$  je konstantní doba odezvy nejvzdálenější  $ONU_{max}$  a je možné ji vypočítat dle následujícího vzorce,

$$T_{eqd} = RspTime_{max} + RTD_{max}. \quad (6.1)$$

Díky topologii a principu fungování celého systému XG-PON tak lze získat se zvyšující se délkou přenosové trasy, klesající hodnotu EqD viz obr. 6.14, kde je ukázáno rozložení generovaných 256 ONU jednotek, kterým je náhodně přiřazena vzdálenost od OLT a tato posloupnost je vzestupně seřazena podle velikosti vzdáleností od OLT.

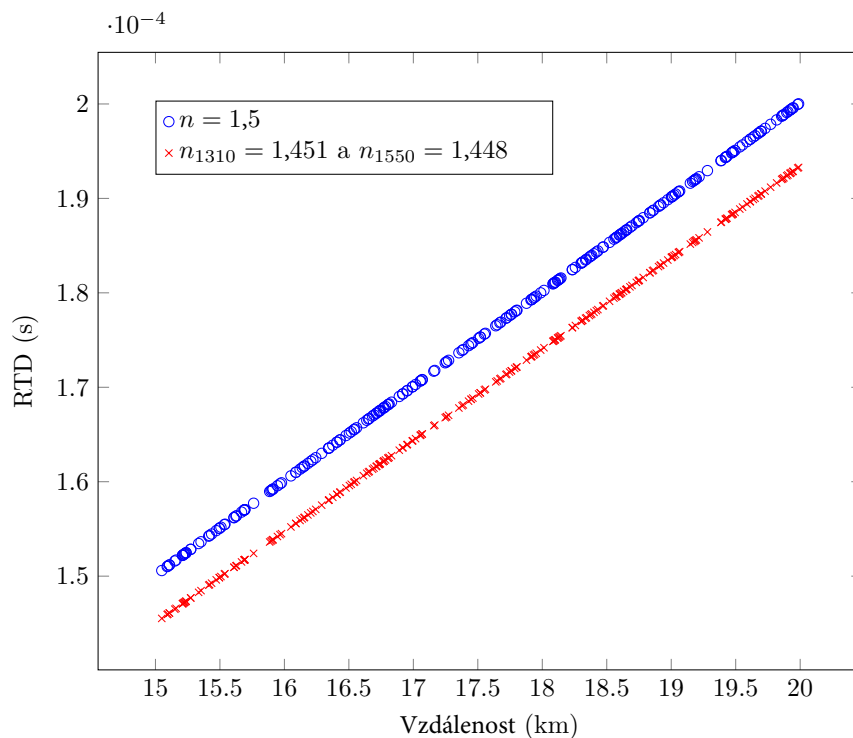


Obr. 6.14: Výpočet EqD pro PON obsahující 256 ONU.

### 6.3.4 Vliv indexu lomu na časování v XG-PON

V literatuře [5], případně [11] je počítáno s hodnotou indexu lomu  $n = 1,5$ . Tato hodnota je stanovena pro sestupný směr i vzestupný směr přenosu. Při nahlédnutí do literatury zabývající se SMF, konkrétně ve standardu G.652 [8], je uvedeno, že index lomu není nutné obecně znát.

Technické dokumentace nejvýznamnějších výrobců optických vláken říká, že index lomu je různý pro různé vlnové délky. Za pomoci těchto dokumentů byly stanoveny jmenovité hodnoty indexu lomu pro nasazení v XG-PON. V této publikaci je počítáno s indexy lomu pro sestupný směr  $n_{1550} = 1,448$  a pro vzestupný směr  $n_{1310} = 1,451$ . Výsledný rozdíl dob šíření lze pozorovat na obr. 6.15.



Obr. 6.15: Závislost doby šíření optického signálu RTD na rozdílném indexu lomu.

Výsledkem je tedy snížení doby přenosu o jednotky  $\mu\text{s}$ , v závislosti na použitém SMF. Použitím SMF s nižším indexem lomu, lze získaný čas využít například pro rozšíření RespTime o více než 5%. Zvýšením RespTime by mohly být kladeny nižší nároky na hardware ONU jednotek. Další možností je navýšení mezirámcových mezer vedoucí zabránění vznikajících kolizí.

## 7 ZÁVĚR

Úkolem této práce bylo zprvu seznámit čtenáře se základní problematikou optických přístupových sítí a pouze teoreticky rozebrat její stěžejní body. Další část byla zaměřena na problematiku slučování kanálů, respektive koncových uživatelů. Popsány byly nejznámější používané techniky v PON a v PON druhé generace.

Problematika koexistence, případně migrace mezi jednotlivými standardy byla vysvětlena v samostatné kapitole a tvoří jednu ze stěžejních myšlenek při tvorbě nových standardů. Vyskytuje se téměř ve všech standardech.

Nejobsáhlejší část práce je zaměřena na standard XG-PON, u kterého byl vysvětlen základní princip a byly definovány jeho dostupné šířky pásma. Dále byla krátce rozebrána fyzická vrstva. Přenosová vrstva XG-PON, respektive její 3 dílčí podvrstvy byly detailně rozebrány stejně jako problematika týkající se stavů ONU jednotek a s nimi související realizace časování v PON.

Na základě teoretických znalostí přenosové vrstvy XG-PON byly sestaveny simulační modely v prostředí Matlab. První z nich popisuje proměnnou účinnost systému při zapouzdření SDU různých velikostí. V případě zkoumání efektivity zapouzdření SDU rámců, lze pozorovat nejlepší výsledky při nasazení ethernetového rámce o velikosti 1518 bajtů a vyšší. Druhý simulační model je zaměřen na výpočet dostupných šířek přenosového pásma při využití respektive nevyužití FEC. Výsledky získané z těchto simulačních modelů byly následně porovnány s výsledky uvedenými v dostupných literaturách. Ověřena byla jejich správnost.

Třetí skupina simulačních modelů byla zaměřena na časování mezi OLT a koncovými jednotkami. Sestavena byla topologie XG-PON v prostředí Matlab. V prvním ze skupiny těchto simulačních modelů, byla zkoumána doba připojování koncových jednotek do PON. Na základě předpokladu, že v jednom časovém cyklu docházelo k připojení jedné ONU a do systému nebyly zahrnuty výpadky již připojených ONU, byla celková doba připojení poslední ONU<sub>256</sub> rovna  $t_{256} = 51$  min. Úpravou dílčích parametrů  $TO1$  a  $t_2$ , bylo docíleno snížení celkové doby připojení ONU<sub>256</sub> až o 19 minut. Druhou ze zkoumaných částí časování mezi OLT a koncovými jednotkami bylo definování kolizních stavů a částečná, případně úplná, eliminace jejich vzniku. Efektivním řešením je v tomto případě dodržení šíře tichého okna společně s vkládáním Random během připojování ONU. Tím lze prvnímu typu kolize částečně předejít vzhledem k počtu současně se připojujících ONU a druhému typu kolize zabránit úplně. V třetím simulačním modelu, aplikovaném na sestavenou topologii, bylo docíleno vyrovnání zpoždění u všech generovaných ONU v celé šíři PON. Tímto simulačním modelem byla také ověřena důležitost stanovení referenční ONU<sub>max</sub>, kdy se jakákoliv nově připojující ONU<sub>i</sub> musí nacházet ve vzdálenosti stejné nebo nižší než je stanovená reference. V posledním simulačním modelu byl zkoumán vliv indexu

lomu na časování v XG-PON. Na základě použití SMF o nižším indexu lomu, bylo docíleno snížení doby přenosu o jednotky  $\mu\text{s}$ . Získaný čas lze využít například pro rozšíření RespTime a dosáhnout nižších nároků na výrobu ONU nebo pro navýšení mezirámcových mezer a dosáhnout zvýšení efektivity při snaze zabránit vzniku kolizních stavů.

Problematika týkající se přenosové vrstvy XG-PON nabízí, díky svému obsáhlému charakteru, celou řadu možností pro budoucí výzkum. Například se lze zaměřit na výpočetní nároky kladené na centrální jednotku a koncové jednotky, zlepšováním přenosových parametrů fyzické vrstvy pozitivně ovlivňovat synchronizaci a časování případně přepracovat rozložení zapouzdření celého PHY rámce a PHY burst.

## LITERATURA

- [1] BALON, R. *TECHNOLOGIE NG - PON* [online]. Praha, 2013 [cit. 2014-11-15]. Dostupné z URL: <[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=66692](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=66692)>. Diplomová práce. VUT Brno. Vedoucí práce prof. Ing. MILOSLAV FILKA, CSc..
- [2] CRISP, J. a BARRY, J. E. *Introduction to Fiber Optics*. Amsterdam: Newnes, 2005. eBook
- [3] EFFENBERGER, F. *Progress in Optical Access Standards* [Online Presentation]. Geneva, Switzerland, 2012 [cit. 2014-10-15]. Dostupné z URL: <<http://slideplayer.us/slide/749675/#>>.
- [4] FILKA, M. *Optoelektronika : Pro telekomunikace a informatiku*. Vyd. 1. Brno : Centa, 2009. 369 s. ISBN 978-80-86785-14-1.
- [5] HOOD, D. a TROJER, E. *Gigabit-capable passive optical networks*. Hoboken: Wiley, c2012, xi, 435 p. ISBN 978-047-0936-870.
- [6] HORVÁTH, T.; ŠIFTA R. a MÜNSTER P. *Co přinese standard NG-PON2?* [online]. VUT Brno. 2014 [cit. 2014-10-1]. Dostupné z URL: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2014020001>>.
- [7] HORVÁTH, T.; KOČÍ, L.; JURČÍK, M. a FILKA, M. *Coexistence GPON, NG-PON, and CATV systems*. International Journal of Engineering Trends and Technology, 2015, roč. 21, č. 2, s. 61-66. ISSN: 2231- 5381.
- [8] ITU-T G.652. *ITU-T G.652: Characteristics of a single-mode optical fibre and cable: Recommendation*. [online]. Switzerland-Geneva, 2009.
- [9] ITU-T G.987.1. *ITU-T G.987.1: 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG PON): General requirements* [online]. 1.0. Switzerland-Geneva, 2010. Dostupné z URL: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.987.1/en>>.
- [10] ITU-T G.987.2. *ITU-T G.987.2: 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Physical media dependent (PMD) layer specification* [online]. 1.0. Switzerland-Geneva, 2010. Dostupné z URL: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.987.2/en>>.
- [11] ITU-T G.987.3. *ITU-T G.987.3: 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Transmission convergence (TC) layer specification* [online]. 1.0. Switzerland-Geneva, 2014. Dostupné z URL: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.987.3/en>>.

- [12] ITU-T G.987.4. *ITU-T G.987.4: 10 Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Reach extension* [online]. 1.0. Switzerland-Geneva, 2012. Dostupné z URL: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.987.4/en>>.
- [13] ITU-T G.989.1. *ITU-T G.989.1:40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): General requirements*. [online]. 1.0. Switzerland-Geneva, 2013. Dostupné z URL: <<http://www.itu.int/rec/T-REC-G.989.1/e>>.
- [14] ITU-T G.989.2. *Draft new Recommendation (40-Gigabit-capable passive optical networks 2 (NG-PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification)* [online]. 1.0. Switzerland-Geneva, 2014. Dostupné z URL: <<http://www.itu.int/ITU-T/aap/AAPRecDetails.aspx?AAPSeqNo=2924>>.
- [15] ITU-T G.989.3. *Draft new Recommendation (40-Gigabit-capable passive optical networks 2 (NG-PON2): Transmission Convergence (TC) layer specification)* [online]. 1.0. Switzerland-Geneva, 2014. Dostupné z URL: <[http://www.itu.int/itu-t/workprog/wp\\_item.aspx?isn=9119](http://www.itu.int/itu-t/workprog/wp_item.aspx?isn=9119)>.
- [16] KOČÍ L. *Proceedings of the 21st Conference STUDENT EEICT 2015: UNITS CONNECTING TO THE XG-PON*. 1. vyd. Brno, 2015. str. 184-186. ISBN 978-80-214-214-5148-3.
- [17] LAFTA, P. *Pasivní optické sítě s rychlostí 10 Gbit/s* [online]. České vysoké učení technické v Praze, FEL. 2011 [cit. 2014-10-8]. Dostupné z URL: <<http://access.fel.cvut.cz/view.php?navezclanku=pasivni-opticke-site-s-rychlosti-10-gbits&cisloclanku=2011030001>>.
- [18] LAFTA, P. *Pasivní optické sítě WDM-PON* [online]. České vysoké učení technické v Praze, FEL. 2009 [cit. 2014-10-7]. Dostupné z URL: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2009050004>>.
- [19] LARSEN, C. P.; A. GAVLER a K. WANG. *Comparison of active and passive optical access networks*. 2010 9th Conference of Telecommunication, Media and Internet. IEEE, 2010, č. 1, s. 1-5. DOI: 10.1109/CTTE.2010.5557694. [cit. 2014-10-7] Dostupné z: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5557694>>.
- [20] MALHOTRA, J., S.; KUMAR, M. a SHARMA, A., K. *Performance Comparison of PS-QPSK and PM-QPSK Modulation Schemes in High Capacity Long Haul DWDM Optical Communication Link*. May 2013, International Journal of Engineering Sciences, s.154-159, ISSN 2306-6474, [cit. 2014-5-15].

- [21] SCHLITTER, P. *Optické přístupové sítě* [online]. České vysoké učení technické v Praze, FEL. 2004 [cit. 2014-11-15]. Dostupné z URL: <<http://access.fel.cvut.cz/view.php?navezclanku=opticke-pristupove-site&cisloclanku=2004072807>>.
- [22] VODRÁŽKA, J. *Základy FTTx* [online]. České vysoké učení technické v Praze, FEL. 2006 [cit. 2014-11-15]. Dostupné z URL: <<http://access.fel.cvut.cz/view.php?navezclanku=zaklady-fttx&cisloclanku=2006051702>>.
- [23] YUANQIU L.; EFFENBERGER F. a GAO, B. *Transmission convergence layer framing in XG-PON1*. 2009 IEEE Sarnoff Symposium [online]. IEEE, 2009, s. 1-5 [cit. 2014-11-1]. DOI: 10.1109/SARNOF.2009.4850314. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4850314>>.
- [24] ZHAO Z.; SHILIN X.; TAO Q.; PINGQING L.; MEIHUA B. a WEISHENG H. *25-GHz-Spaced DWDM-PON With Mitigated Rayleigh Backscattering and Back-Reflection Effects*. 2013 IEEE Photonics Journal. 5(4): 7901407-7901407. [cit. 2015-5-15]. DOI: 10.1109/JPHOT.2013.2271717. ISSN 1943-0655.
- [25] ŽENTEK, J. *Vývoj pasivních optických přístupových sítí*. 1. Vydání Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT, 2010, 2012, 70 s.

## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

10GEAPON	10 Gigabit Ethernet Passive Optical Network
AON	Active Optical Network
APON	Asynchronous Transfer Mode Passive Optical Network
AWG	Arrayed Waveguide Grating
BPON	Broadband Passive Optical Network
BIP	Bit Interleaved Parity
BWmap	Bandwidth Map
CPON	Composite Passive Optical Network
CWDM	Coarse Wavelength Division Multiplexing
DBA	Dynamic Bandwidth Allocation
DBF	Distributed Feedback Laser
DOW <sub><i>i</i></sub>	Drift of Window
DWA	Dynamic Wavelength Assignment
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
EDFA	Erbium Doped Fiber Amplifier
EPON	Ethernet Passive Optical Network
EqD	Equalization Delay
FEC	Forward Error Correction
FP	Fabry Perot
FTTA	Fiber To The Antenna
FTTB	Fiber To The Building
FTTC	Fiber To The Curb
FTTCab	Fiber To The Cabinet
FTTCell	Fiber To The Cell

FTTH	Fiber To The Home
FTTN	Fiber To The Node
FTTO	Fiber To The Office
FTTx	Fiber To The x
FWI	Forced Wake-up Indication
GPON	Gigabit Passive Optical Network
HD	High Definition
HEC	Hybrid Error Correction
ICI	Inter Carrier Interference
ISI	Inter Symbol Interface
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	Internet Protocol
ISDN	Integrated Services Digital Network
ITU-T	International Telecommunication Union
LODS	Loss Of Downstream Synchronization
LF	Last Fragment
M-QAM	M-ary Quadrature Amplitude Modulation
NRZ	Non Return to Zero
NT	Network Terminal
NG-PON2	Next Generation Passive Optical Networks 2
OAN	Optical Access Network
ODN	Optical Distribution Network
OFDM-PON	Orthogonal Frequency Division Multiplexing Passive Optical Network
OLT	Optical Line Terminal

ONT	Optical Network Terminal
ONU	Optical Network Unit
P2MP	Point to Multipoint
P2P	Point to Point
PHY	Physical Layer
PLI	Payload Length Indication
PLOAM	Physical Layer Operations, Administration And Maintenance
PLOAMd	Physical Layer Operations, Administration And Maintenance download
PLOAMu	Physical Layer Operations, Administration And Maintenance upload
PON	Passive Optical Network
PM-QPSK	Polarization-Multiplexing and Quadrature Phase Shift Keying
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RS	Reed-Solomon
RTD	Round-Trip Delay
SDU	Service Data Unit
SMF	Single-mode Optical Fiber
TDM-PON	Time Division Multiplexing Passive Optical Network
TDMA	Time Division Multiple Access
TIW <sub>i</sub>	Transmission Interface Warning
TWDM-PON	Time and Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network
UDWDM-PON	Ultra Dense Wavelength Division Multiplexing Passive Optical Network
WDD	Wavelength Division Duplex

WDM-PON	Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Network
XG-PON	10-Gigabit-capable Passive Optical Network
XGEM	XG-PON Encapsulation Method
XGTC	XG-PON Transmission Convergence Layer

# SEZNAM PŘÍLOH

<b>A Příloha A</b>	<b>86</b>
A.1 Ukázky zdrojových kódů . . . . .	86
A.1.1 Zapouzdření SDU v XG-PON . . . . .	86
A.1.2 Vliv FEC na dostupnou šířku pásma . . . . .	87
<b>B Příloha B</b>	<b>89</b>
B.1 Obsah přiloženého CD . . . . .	89

# A PŘÍLOHA A

## A.1 Ukázky zdrojových kódů

### A.1.1 Zapouzdření SDU v XG-PON

```
1 SDU = [64, 128, 256, 512, 1024, 1518, 2000];
2 N = 1;
3 P = 1;
4 Hlend = 4;
5 BWmap = N*8;
6 PLOAMd = P*48;
7 PSBd = 24;
8 PHY = 155496;
9 XGTCf = 135432;
10
11 PHYf = PSBd+PHY;%soucet velikosti PHY ramce
12 XGTCh = Hlend+BWmap+PLOAMd;%vypocet hlavicky XGTC ramce
13 XGTCud = XGTCf-XGTCh;%vypocet uzitecneho datoveho pole XGTC
14 XGEM = SDU+8;%vypocet velikosti jednoho XGEM ramce
15 X = XGTCud./XGEM;%pocet XGEM ramecu obsazenych v XGTC uzit.
    dat. p.
16 pocetdatramcusdu = fix(X);
17 a = pocetdatramcusdu*8;%vypocet nadbytecnych dat vlivem
    obsahu XGEM hlavicek
18 ucinnost = 100-(a/(XGTCud/100));%vypocet ucinnosti
19
20 figure(1);
21 clf;
22 bar(SDU, ucinnost);
23 xlabel('Velikost SDU [bajt]');
24 ylabel('Ucinnost zapouzdeni XGEM ramcu [%]');
25 title('Zavislost ucinnosti XGEM zapouzdeni na velikosti SDU
    ');
```

## A.1.2 Vliv FEC na dostupnou šířku pásma

```
1 %_____SESTUPNY SMER_____
2 PHYf = 155520;
3 XGTCf = 135432;
4 PHYf_time = 0.000125;
5 FEC_codeword_sum = XGTCf/216; %pocet FEC kodovych slov
6 redundanc_FEC = FEC_codeword_sum*32; %soucet FEC parity v
   ramci
7 sum_frame = 1/PHYf_time; %pocet PHY ramcu v sestupnem smeru
   za sekundu
8 redundanc_sum = redundanc_FEC*sum_frame*8; %soucet FEC
   parity v 8000 ramcich za 1 sekundu
9 bitrate = sum_frame*PHYf*8 %vypocet maximalni prenosove
   rychlosti
10 user_rate = bitrate-redundanc_sum %vypocet efektivni
   prenosove rychlosti bez FEC
11 %_____VZESTUPNY SMER_____
12 PHYb = 38880;
13 preamble = 20;
14 delimiter = 4;
15 XGTCb = PHYb-preamble-delimiter;
16 PHYb_time = 0.000125;
17 FEC_codeword_sum_beta = XGTCb/232; %pocet FEC kodovych slov
18 FEC_codeword_sum_up = ceil(FEC_codeword_sum_beta); %pocet
   FEC kodovych slov zaokrouhleni nahoru vzhledem ke
   zkracnemu kodovemu slovu
19 redundanc_FEC_up = FEC_codeword_sum_up*16; %soucet FEC
   parity v ramci
20 sum_frame_up = 1/PHYb_time; %pocet PHY ramcu v sestupnem
   smeru za sekundu
21 redundanc_sum_up = redundanc_FEC_up*sum_frame_up*8; %soucet
   FEC parity v 8000 ramcich za 1 sekundu
22 bitrate_up = sum_frame_up*PHYb*8 %vypocet maximalni
   prenosove rychlosti
23 user_rate_up = bitrate_up-redundanc_sum_up %vypocet
   efektivni prenosove rychlosti bez FEC
24 %_____
25 figure (1) ;
```

```

26 Y = [ bitrate , user_rate ;
27 bitrate_up , user_rate_up ] ;
28 hBars = bar(Y) ;
29 xlabel('1 – sestupny smer, 2 – vzestupny smer');
30 ylabel('Dostupna sirka pasma [Gbit/s]');
31 legend ( ' FEC vypnuto ' , 'FEC zapnuto ' )
32 title('Porovnani dostupne sirky pasma u sestupneho a
        vzestupneho smeru pri zapnutem a vypnutem FEC');
33 %_____
34 ONU = [16, 32, 64, 128, 256, 512];
35 FEC_ON = bitrate./ONU;
36 FEC_OFF = user_rate./ONU;
37 FEC_ON_up = bitrate_up./ONU;
38 FEC_OFF_up = user_rate_up./ONU;
39 figure(2);
40 clf;
41 plot(ONU,FEC_ON,'k',ONU,FEC_OFF,'g',ONU,FEC_ON_up,'b',ONU,
        FEC_OFF_up,'r');
42 xlabel('Pocet ONU jednotek');
43 ylabel('Dostupna sirka pasma [bit/s]');
44 legend('sestupny smer – FEC vypnuto', 'sestupny smer – FEC
        zapnuto', 'vzestupny smer – FEC vypnuto', 'vzestupny smer
        – FEC zapnuto')
45 title('Zavislost dostupne sirky pasma u sestupneho smeru,
        pri zapnutem a vypnutem FEC, na poctu ONU');

```

## **B PŘÍLOHA B**

### **B.1 Obsah příloženého CD**

Na příloženém CD jsou, kromě elektronické verze práce ve formátu pdf, umístěny spustitelné soubory typu `M-file` realizované v MathWorks Matlab R2014a. Tyto spustitelné soubory v archivu `priloha.zip` jsou opatřeny heslem, které lze získat na emailové adrese `xkocil00@stud.feec.vutbr.cz`.