

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

NÁVRH A SIMULACE OPTICKÉ PŘÍSTUPOVÉ SÍTĚ TYPU PON

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

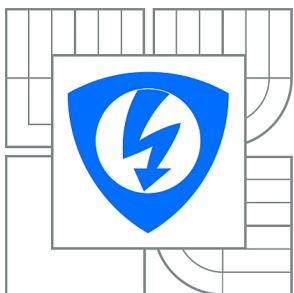
Bc. JIŘÍ MIKAUŠ

BRNO 2012



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

NÁVRH A SIMULACE OPTICKÉ PŘÍSTUPOVÉ SÍTĚ TYPU PON

DESIGN AND SIMULATION OF PASSIVE OPTICAL NETWORK PON

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. JIŘÍ MIKAUŠ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PAVEL REICHERT

BRNO 2012



VYSOKÉ U ENÍ
TECHNICKÉ V BRN

Fakulta elektrotechniky
a komunika ních technologií

Ústav telekomunikací

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Telekomunika ní a informa ní technika

Student: Bc. Ji í Mikauš

ID: 109698

Ro ník: 2

Akademický rok: 2011/2012

NÁZEV TÉMATU:

Návrh a simulace optické p ístupové síť typu PON

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prove te rozbor návrhu optické p ístupové síť . Zam te se na jednotlivé topologie a standardy u optických síť typu PON (GPON, EPON, GEAPON, WDM PON, Hybridní PON). Prove te podrobnou analýzu jednotlivých standard . V prost edí OPNET Modeler vytvo te modely síť typu PON. V rámci praktické ásti vytvo te v simula níím prost edí scéná e, v kterých budou demonstrovány funk ní PON. Navrhni te nejvhodn ější konfiguraci síť a jejich prvk tak aby bylo zohledn no prom nlivé zatížení síť . Uvažujte využití služeb TriplePlay. Prove te n kolik simulací vytvo ených scéná a výsledky p ehledn komentujte.

DOPORU ENÁ LITERATURA:

Literatura:

[1] KUCHARSKI, M., DUBSKÝ, P.: M ení p enosových parametr optických vláken, kabel a tras, MIKROKOM, Praha 1998

[2] PFEIFFER, Thomas, et al. OPTICAL FIBERS PAVE THE WAY TO FASTER BRODBAND ACCESS. In PFEIFFER, Thomas, et al. Alcatel Telecommunications Review. 2005th edition. [s.l.] : [s.n.], [2005]. s. 1-9.

[3] OPNET Technologies, OPNET Modeler Product Documentation Release 16.0, OPNET Technologies Inc., 2010

Termín zadání: 6.2.2012

Termín odevzdání: 24.5.2012

Vedoucí práce: Ing. Pavel Reichert

Konzultanti diplomové práce:

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.

P edseda oborové rady

UPOZORN NÍ:

Autor diplomové práce nesmí p i vytvá ení diplomové práce porušit autorská práva t etích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným zp sobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být pln v dom následk porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona . 121/2000 Sb., v etn možných trestn právních d sledk vyplývajících z ustanovení ásti druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku .40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce bylo demonstrovat zvolenou PON síť v simulačním nástroji OPNET Modeler. Práce se věnuje pasivním optickým sítím. Zejména pak řešením, která jsou založená na přenosu Ethernet rámců. V teoretické části jsou popsány standardy EPON a 10GEAPON. Standard EPON byl představen již v roce 2004. Novější 10GEAPON je zpětně plně kompatibilní, což jej předurčuje jako vhodné řešení pro moderní síť s vyšším nárokem na přenosové rychlosti.

V praktické části je popsán postup při tvorbě síťových komponent pro simulaci pasivní optické sítě. V simulačním nástroji byl vytvořen model EPON, který demonstruje základní vlastnosti standardu IEEE 802.3ah. Model dynamicky alokuje časové sloty pro přístup na sdílené médium koncových jednotek ve vzestupném směru. V poslední části jsou demonstrovány výsledky simulace.

KLÍČOVÁ SLOVA

Pasivní optická síť, PON, EPON, OPNET Modeler

ABSTRACT

The aim of master's thesis was to demonstrate chosen PON network in simulation software OPNET Modeler. The work deals with passive optical networks. In particular, solutions that are based on the transmission of Ethernet frames. EPON and 10GEAPON standards are described in theoretical section. EPON Standard was introduced already in 2004. Newer 10GEAPON is back compatible, which is ideal as a suitable solution for modern network with a high data rates demands.

The practical part describes process of developing network nodes for passive optical network. EPON model was developed in simulation tool, that demonstrates basic features of the standard IEEE 802.3ah. The simulation results are demonstrated in last section.

KEYWORDS

Passive optical network, PON, EPON, OPNET Modeler

MIKAUŠ, Jiří. *Návrh a simulace optické přístupové sítě typu PON*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2012. 66 s. Vedoucí práce Ing. Pavel Reichert

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Návrh a simulace optické přístupové sítě typu 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 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu práce Ing. Pavlu Reichertovi za cenné rady při zpracování této diplomové práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

Výzkum popsáný 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.

OBSAH

Úvod	11
1 Optické přístupové sítě	12
1.1 Úvod	12
1.2 Pasivní optické sítě	14
1.2.1 EPON	16
1.2.2 10GEPON	21
2 Návrh modelu	23
2.1 OPNET Modeler	23
2.1.1 Vrstvy modelu	23
2.2 Vlastnosti modelu	25
2.2.1 Komunikace MPCP v modelu	25
2.2.2 Plánování grantů	26
2.2.3 Podpora kvality služeb	27
2.3 Entity modelu	28
2.3.1 Datové jednotky v MPCP	28
2.3.2 Linka	32
2.3.3 Splitter	32
2.3.4 OLT	33
2.3.5 ONU	36
2.3.6 Generátor provozu	42
3 Výsledky studentské práce	43
3.1 Topologie a parametry sítě	43
3.2 Výsledky simulací	44
3.2.1 Scénář 1 – srovnání dynamické a statické alokace	44
3.2.2 Scénář 2 – funkce maximálního okna	46
3.2.3 Scénář 3 – podpora QoS	48
4 Závěr	52
Literatura	54
Seznam symbolů, veličin a zkratk	56
Seznam příloh	59
A Porovnání standardů EPON a 10GEPON	60

B	Přiložené grafy	61
C	Obsah přiloženého DVD	66

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Typy FTTx.	13
1.2	Výměna datových jednotek v PON.	15
1.3	Struktura standardního rámce v EPON.	18
2.1	Řídící komunikace MPCP v modelu.	26
2.2	Formát GATE zprávy.	30
2.3	Formát REPORT zprávy.	31
2.4	Pasivní optický splitter – model.	32
2.5	Model OLT jednotky.	33
2.6	Model procesů – filter	34
2.7	Stavový model processoru OLT.	35
2.8	Vývojový diagram dynamického módu přidělování grantů v OLT.	37
2.9	Model ONU	38
2.10	Stavový model filteru v ONU.	39
2.11	Stavový model procesoru v ONU.	39
2.12	Stavový model fronty.	41
3.1	Topologie simulované PON sítě.	43
3.2	Velikost fronty v <i>ONU1</i> při statické a dynamické alokaci.	45
3.3	Průměrné zpoždění fronty v <i>ONU1</i> při statické a dynamické alokaci.	46
3.4	Velikost fronty v <i>ONU1</i> pro 2. scénář.	47
3.5	Průměrné zpoždění fronty v <i>ONU1</i> pro 2. scénář.	48
3.6	Topologie sítě pro scénář 3.	49
3.7	Závislost průměrného zpoždění front v <i>ONU1</i> na čase.	50
3.8	Absolutní zpoždění front v <i>ONU1</i>	51
B.1	Scénář 1 – provoz v síti, statická alokace.	61
B.2	Scénář 1 – provoz v síti, statická alokace.	62
B.3	Scénář 3 – Průměrné zpoždění všech aktivních front v <i>ONU1</i>	63
B.4	Scénář 3 – závislost absolutního zpoždění fronty 6 v <i>ONU1</i>	64
B.5	Scénář 3 – Závislost absolutního zpoždění front v <i>ONU2</i> až <i>ONU5</i>	65

SEZNAM TABULEK

2.1	Váhy a třídy provozu pro jednotlivé fronty.	40
3.1	Parametry sítě při simulaci.	44
A.1	Srovnání vlastností standardů EPON a 10GEAPON.	60

ÚVOD

V poslední dekádě dochází k narůstajícím požadavkům na rychlost přenosu a ke zvyšujícímu se objemu přenesených dat až do koncových bodů sítě, tedy ke koncovému zákazníkovi. Přičemž tyto požadavky neustále narůstají. Tyto zvýšené nároky na přenos jsou způsobeny zvedáním počtu připojených uživatelů a zařízení k internetu, vývojem chování uživatelů internetu a využitím připojení k síti i pro další služby jako jsou například video na vyžádání, internetová telefonie a přenos televizního vysílání. Pro firemní zákazníky je stále důležitější spolehlivost spoje a rychlost přenosu dat ve vzestupném směru komunikace. Čím dál více služeb běží na vzdálených serverech. Například se rozšiřují vzdáleně virtualizované operační systémy a nastávajícím trendem je všechna firemní data zálohovat pomocí cloud služeb. V nejbližší budoucnosti budou majoritními přenášenými daty videa pro telefonii a ve sféře koncového zákazníka se bude jednat o tzv. služby triple play.

Poslední míle přístupové telekomunikační sítě dnes tvoří nejužší místo propojující vysokorychlostní páteřní sítě s lokálními sítěmi. Jedním řešením tohoto problému je využití optických technologií při budování právě přístupových sítí. Páteřní sítě jsou již dostatečně dimenzovány a jsou tvořeny optickými vlákny, proto je novým trendem nahrazování metalických spojů v koncových přístupových sítích optickými vlákny. V nejlepším případě budou vlákna přivedena přímo až ke koncovému bodu sítě. Toto řešení se jeví jako nejperspektivnější, protože přenos po optickém přenosovém médiu dosahuje z fyzického hlediska nejvyšších rychlostí. Dále na rozdíl od metalických spojů optické spoje nepodléhají téměř žádnému rušení, nedochází k přeslechům na koncích vedení a prakticky je nelze odposlouchávat bez přerušování spoje. Nevýhodou optických sítí jsou jejich vysoké pořizovací náklady, ať už na pokládání optických vláken, nebo na síťové prvky. Možným řešením je použití pasivních optických sítí, kde odpadá problém s umístěním aktivních prvků na poslední míli a jejich údržbou, napájením, monitoringem, atd. Pasivní optické sítě mají také dobré vyhlídky, obzvláště co se týče vývoje a možnosti zrychlení jednotlivých technologií, například pomocí vlnového multiplexování.

Úvodní část této práce se zabývá teoretickým popisem optických sítí s důkladným zaměřením na pasivní optické sítě. Dále jsou zde popsány některé standardy pro tyto infrastruktury.

Poslední část se zabývá simulací pasivních optických sítí v simulačním nástroji OPNET Modeler, ve kterém byl vyvinut model pasivní optické sítě EPON, která funguje na bázi přenosu Ethernet rámců. V modelu byly navrženy základní síťové jednotky i linka simulující optické vlákno. Optické linkové zakončení dynamicky přiděluje šířku pásma ve vzestupném směru dle aktuálních potřeb každé koncové jednotky.

1 OPTICKÉ PŘÍSTUPOVÉ SÍTĚ

1.1 Úvod

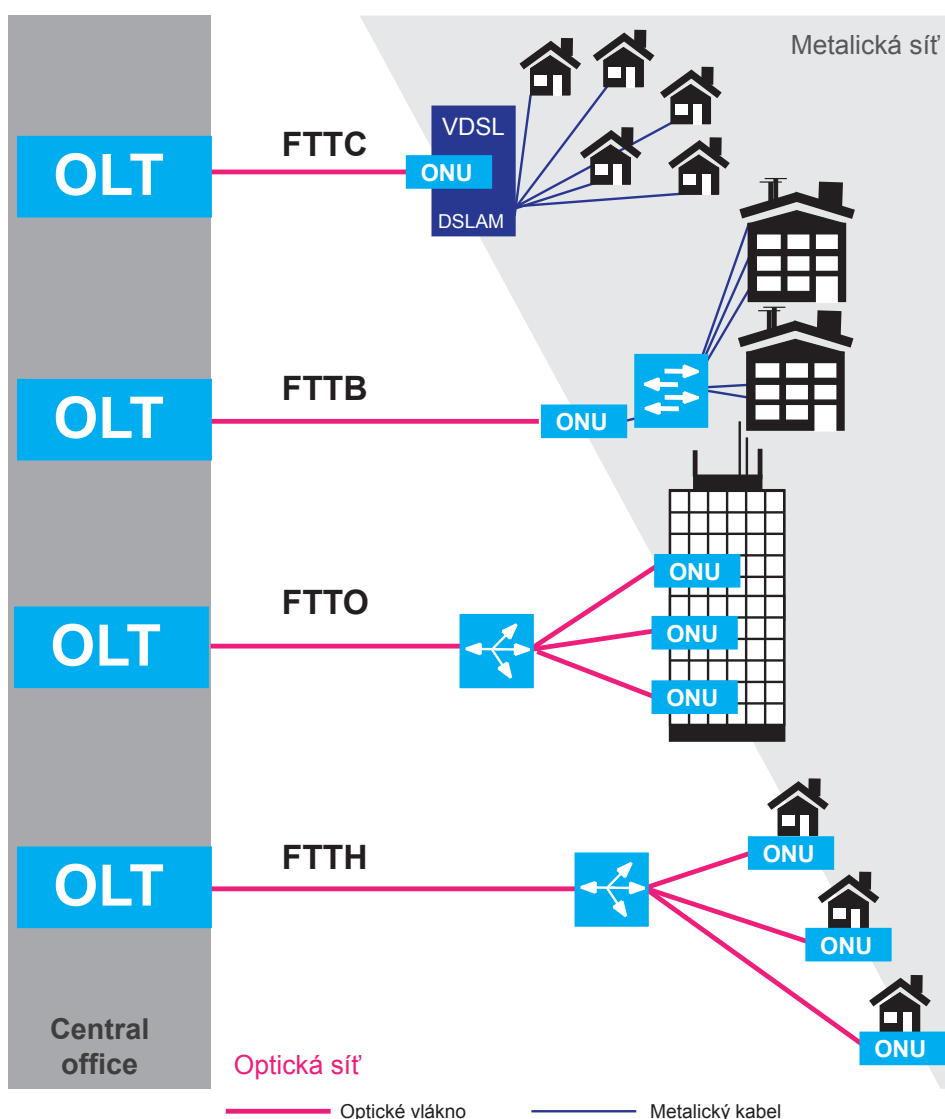
Optické distribuční sítě ODN (Optical Distribution Network) se skládají z několika jednotek. Základní stavební jednotkou je optické linkové zakončení OLT (Optical Link Termination). Zařízení je umístěno v CO (Central Office) a převádí protokoly využitě v ODN na protokoly využívané v páteřní síti. Další neoddelitelnou funkcí zařízení je dohled a správa nad koncovými jednotkami síťového zakončení ONT (Optical Network Termination), či síťovými jednotkami ONU (Optical Network Unit). Optická síťová jednotka zprostředkuje spojení koncové lokální sítě s optickou přístupovou sítí, a to pomocí různých řešení např. xDSL (Digital Subscriber Line), Ethernet, aj.

Optické přístupové sítě lze rozdělit dle několika hledisek. Základním rozdělením je dle způsobu připojení koncových bodů do sítě.

- **Bod – bod** (PtP – Point to Point) – Topologie známá například ze sítí LAN, kde je pro každý koncový uzel zbudován zvláštní spoj. V optických sítích musí být vlákna přivedena z centrálního bodu sítě CO až ke koncovým bodům. Nevýhodou tohoto řešení je cena, vysoký počet vysílacích jednotek, aktivních zařízení a nutnost velkých prostor v CO pro ukončení všech jednotlivých vláken. Umístěním prepínačů do vzdálených částí sítě se sníží počet vláken vedoucích až do CO, ale naroste počet optických vysílačů. Tyto sítě lze označit také jako aktivní.
- **Bod – mnoho bodů** (PtMP – Point to Multi Point) – Mnohabodová topologie je typická pro pasivní optické sítě, kdy je z CO vedeno jedno vlákno pro větší počet koncových bodů přístupové sítě a aktivní síťové jednotky v síti jsou nahrazeny pasivními rozbočovači (splitter) v různém dělicím poměru (maximálně 1:64 či 1:128). Tyto sítě se nazývají pasivní optické sítě PON (Passive Optical Network). Různé druhy pasivních optických sítí jsou zobrazeny na obr. 1.1.

Podle způsobu ukončení optických vláken v přístupové síti a jejich celkového provedení lze PON obecně dělit na sítě typu FTTx (Fiber to the x), kde je optická síť zakončena různými formami metalické či bezdrátové sítě. Tyto sítě se někdy také označují jako hybridní a primárně byly zavedeny z důvodu úspor při realizaci. Poté záleží na konkrétním typu sítě FTTx, kam až sahá vlákno a jakou technologií je tvořena poslední část sítě. Souhrnný přehled druhů FTTx je vyobrazen na obrázku 1.1.

- **FTTC** (Fiber to the Curb) – vlákna jsou přivedena do blízkosti seskupení domů, kde je umístěn rozvaděč – DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplexer). Koncové body sítě jsou poté připojeny (často stávající) strukturovanou či koaxiální kabeláží. Tato varianta tedy představuje kombinaci optické a navazující metalické sítě. Podobným typem je struktura FTTN (Fiber to the Node), často nazývaná také FTTCab (Fiber to the Cabinet), liší se pouze v umístění koncového rozvaděče, kde u FTTN jsou rozvaděče umístěny dál od koncových bodů a často také obsluhují větší počet koncových zákazníků. Vysokorychlostní přenosy v poslední míli jsou poskytovány technologiemi, jako jsou digitální přípojky xDSL zejména VDSL (Very High Speed DSL) a VDSL2 či DOCSIS (Data Over Cable Service Interface Specification).



Obr. 1.1: Typy FTTx.

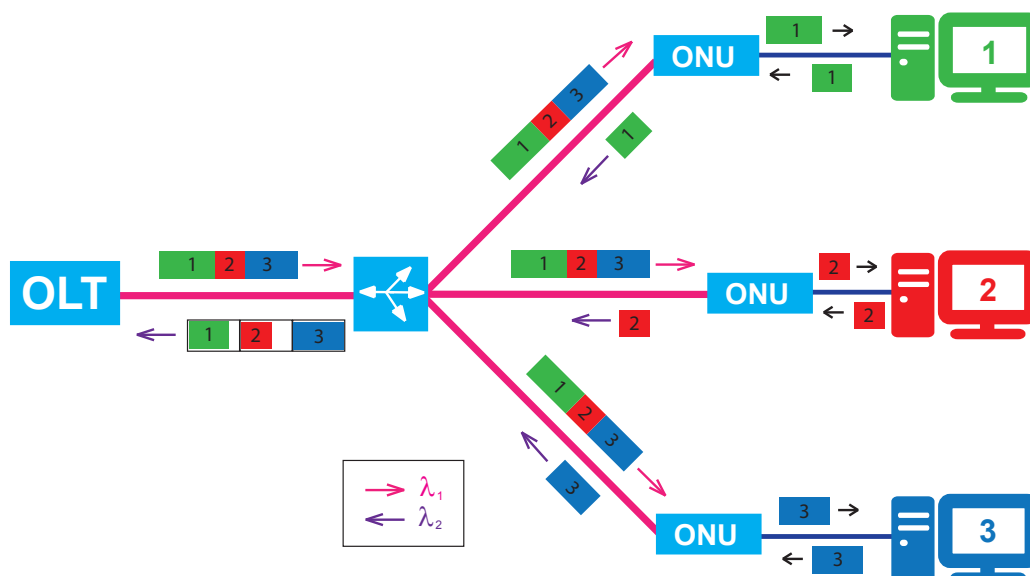
- **FTTB** (Fiber to the Building) – zde se vlákna přivádějí až do samotných budov. V rámci budovy je poté vytvořena lokální síť nejčastěji pomocí LAN (Local Area Network) na bázi Ethernetu. V budoucnu by mohly být místní domovní rozvody nahrazeny optickými vlákny POF (Plastic Optical Fiber). FTTB může být řešené pomocí PtP nebo PtMP sítí.
- **FTTO** (Fiber to the Office) – je již čistě optickým řešením bez navazujícího segmentu metalické sítě. Vlákna jsou přivedena až do specifických prostor budov např. do prostor jednotlivých kanceláří, kde jsou vysoké nároky na přenosové kapacity. Ve firemní sféře se na rozdíl od domácího využití sítě hledí na symetrii přenosu dat, kdy je vzestupný směr stejně důležitý jako sestupný (záloha dat, cloud služby, serverové služby, atp.). Dále je velice důležitá odezva, spolehlivost, bezpečnost přenášených dat (zejména kvůli častému připojení k privátním sítím VPN (Virtual Private Network) a možnosti zálohování spojů. Jednotlivé koncové body jsou poté připojeny pomocí místní sítě LAN.
- **FTTH** (Fiber to the Home) – konfigurace, kde jsou optická vlákna přiváděna až do koncových bodů sítě. Celá trasa z CO až ke koncovému bodu sítě je tedy tvořena optickým spojem a nabízí tak nejlepší prostředí pro vysokorychlostní přenosy. V domácím prostředí bude nejvíce využívána kombinace služeb pro přenos videa, hlasu a dat v jedné nabídce - triple play. Tuto nabídku nejčastěji tvoří vysokorychlostní datové připojení k internetu, internetová telefonie realizovaná pomocí VoIP (Voice over Internet Protocol) a multimediální služby pro šíření videa v různé kvalitě. Video na vyžádání označované jako VoD (Video on Demand) či IPTV (Internet Protocol television). Z těchto požadavků plyne, že zatížení linky je více v sestupném směru (downlink), tudíž se tyto sítě často tvoří jako asymetrické. Varianty FTTH a FTTO jsou z důvodu plně optické trasy sítě finančně nejnákladnějším řešením. [9]

1.2 Pasivní optické sítě

Topologie pasivní optické sítě může být tvořena několika způsoby. Obvykle stromová, kruhová, či sběrníková. V praxi je pro PON nejtypičtější topologií jednoduchá stromová, či stromová rozvětvená. Při realizaci je vhodné dovést vlákno od OLT co nejbližší ke koncovým částem sítě, a teprve zde provést rozvětvení pomocí pasivního optického rozbočovače. K němu se připojí určitý počet koncových jednotek dle požadovaného dělicího poměru pro daný logický objekt. Jedná se často o bytový dům, či komplex rodinných domů v případě FTTB resp. FTTH architektury.

Pro oddělení směrů komunikace musí být signál duplexován. Způsob duplexování, kde se pro každý směr použije jiné optické vlákno se nazývá prostorové dělení (SDD - Space Division Duplex). Nevýhodou tohoto řešení je dvojnásobný počet všech instalovaných vláken ku počtu spojů, což se nepříznivě projeví na výsledné kalkulaci. Téměř vždy využívanou metodou duplexování je tedy vlnové oddělení, kde je pro každý směr využita jiná vlnová délka přenášeného signálu (WDD - Wave Division Duplex). V různých standardech jsou signály přenášeny na jiných vlnových délkách. Například pro standard EPON je to pro vzestupný směr 1490 ± 10 nm a pro sestupný 1310 ± 50 nm.

Pro zajištění stromové struktury sítě je potřeba optický signál vhodně rozbočit do více větví. K tomu slouží zařízení nazývané pasivní optický rozbočovač (splitter), který dělí optický signál v jistém poměru ve směru od OLT k ONU jednotkám a v opačném směru slučuje optické signály z více vstupů do jediného výstupu. Dělicí poměr je udáván ve tvaru 1:N, kde N udává počet výstupů rozbočovače. Pasivní rozbočovače se vyrábějí dvojí technologií. FBT (Fused Biconic Taper), kdy pomocí spojování 2–4 optických vláken při vysoké teplotě a tlaku vznikají tzv. Y články, které jsou řazeny kaskádně až do požadovaného poměru rozbočení. Druhou technologií je PLC (Planar Lightwave Circuit), kde jsou splitterů vyrobeny planární technologií vytvořeny požadované struktury Y článků na substrátu křemíku. Důležitým parametrem je hodnota vložného útlumu, udávající celkový útlum rozbočovače. Pro jeden Y článek s rozbočením 1:2 je vložný útlum cca 3 dB. Počet N nabývá různých hodnot, např. 1:8 – 1:128. [2]



Obr. 1.2: Výměna datových jednotek v PON.

Ve vzestupném směru (uplink) komunikace dochází k rovnoměrnému rozdělení optického signálu do všech větví. Do všech ONU jednotek tedy přicházejí stejná data. ONU jednotky zpracovávají jen pro ně určená data, která jsou navíc zabezpečena šifrováním, aby nedocházelo k nežádoucímu odposlechu. Při komunikaci ve vzestupném směru by při současném vysílání více ONU jednotek docházelo ke kolizím. Vysílání musí být řešeno vhodnou přístupovou metodou. V PON je využito schématu TDMA (Time Division Multiple Access), kdy do jednotlivých časových slotů jsou umísťovány datové zprávy od jednotlivých ONU. Obrázek 1.2 zobrazuje výše zmíněný způsob komunikace. Časové rámce ve směru vzestupném jsou zde staticky nastaveny, tudíž je komunikace neefektivní, protože ONU jednotky, které nemají ve frontě zprávy k vyslání, zbytečně dostávají časový slot pro přenos. Proto se využívá dynamicky alokované šířky pásma ve vzestupném směru. Pro zvýšení propustnosti můžou být všechny přenosy navíc vlnově multiplexovány pomocí WDM (Wave Division Multiplex), čímž se rapidně zvýší propustnost sítě. Síťové prostředky je také vhodné jistým způsobem zálohovat. Zálohování se realizuje redundancí prvků sítě, což nepříznivě navyšuje cenu provozu sítě i samotné výstavby. Redundance se nasazuje na různých úrovních. Jsou zdvojeny buď jen optické vlákna, nebo i všechna síťová zařízení. Přepínání na zálohované prvky může probíhat automaticky, nebo zásahem správce sítě.

1.2.1 EPON

Ethernet PON je definována standardem IEEE 802.3ah, který definuje fyzickou a linkovou vrstvu. Základní vlastnosti EPON sítě zůstávají obdobné jako u obecných pasivních optických sítí. Topologie je nejčastěji stromová či stromová rozvětvená. EPON disponuje přenosovými rychlostmi 1 Gbps symetricky. Maximální dosah sítě je 20 km. Nejvyšší možný počet připojených koncových ONU jednotek je 32. Kódování probíhá dle schématu 8b/10b, kde se na linkové vrstvě 8 b (užitečných) převádí na 10 b. Režie kódu je tedy 20%. Více o fyzických vlastnostech standardu v tabulce A.1.

Přenos dat v EPON je obdobný jako v obecné PON síti. Provoz v síti je plně duplexní, což je zajištěno pomocí dvou vlnových délek, jednou pro každý směr provozu. V sestupném směru je využito časového multiplexu TDM. OLT jednotka vysílá v časových multirámecích, do kterých se umísťují Ethernet rámce. Tyto rámce mají stejný tvar jako u standardu Ethernet, pouze s pozměněným záhlavím. Ve směru k účastníkovi data přijímají všechny ONU jednotky, poté se rozhodují, zda jim data náleží, či nikoliv. Ve směru vzestupném uživatelská data přijímá pouze OLT. Přístupovou metodou v tomto směru je TDMA. Data od uživatelů jsou opět vysílána v časových intervalech, které jsou ONU jednotkám přiděleny buď dynamicky, nebo

staticky. Provoz v EPON síti je demonstrován na obrázku 1.2, kde ve vzestupném směru jsou časové intervaly přidělovány staticky. Pokud přenášená data nevyplní celý časový interval, zůstává v něm nevyužitá místa a plýtvá se tak síťovými prostředky. Protože v sestupném směru přijímají data všechny koncové jednotky, je potřeba tato data šifrovat, aby nebylo možné odposlouchávat cizí informace. Šifrují se pouze uživatelská data. Hlavičky rámců zůstávají nezašifrovány. Šifrovací klíče generuje ONU jednotka a odesílá je poté ve směru vzestupném. V tomto směru nehrozí odposlouchávání. Šifrování probíhá pomocí standardu AES (Advanced Encryption Standard). Klíče mohou nabývat délky 128, 192 nebo 256 Bajtů.

Protokol MPCP

Multi-point Control Protocol je součástí standardu. Zajišťuje alokaci časových intervalů ve směru vzestupném, pro efektivní využití přenosové kapacity spoje. Specifikuje proces objevování a registraci nově připojených ONU jednotek, jejich řízení a synchronizaci. Protokol dále definuje formát základního přenášeného rámce a pět řídicích rámců na linkové vrstvě. GATE a REPORT zprávy pro řízení přidělované šířky pásma ONU jednotkám a zprávy REGISTER_REQUEST, REGISTER a REGISTER_ACK¹ přenášené během auto-discovery módu.

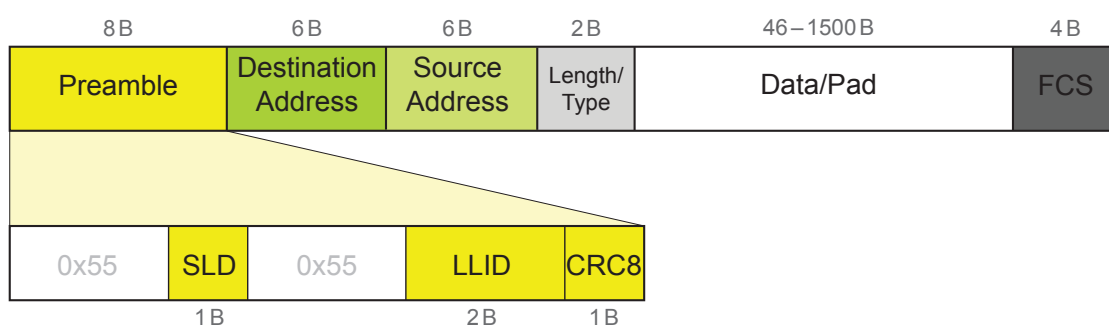
ONU jednotkám přidělené časové intervaly se nazývají granty. Dokud ONU jednotce není přidělen grant, nesmí vysílat. Poté, co jej obdrží, vysílá svá data v maximální přenosové rychlosti po dobu trvání časového slotu (grantu). Řízení komunikace probíhá pomocí zpráv GATE a REPORT². GATE slouží k informování ONU jednotek o přiděleném grantu (doba trvání časového slotu). ONU jednotka v každém grantu odešle spolu s daty jednu REPORT zprávu, ve které informuje OLT o velikosti svých vyrovnávacích front. Na základě těchto informací OLT provádí výpočet délky přidělených intervalů pro každou ONU. To se projeví v následujícím cyklu. OLT odesílá všechny GATE zprávy v jednom multirámcí. ONU jednotky poté v přidělených slotech odpovídají REPORT zprávami. [6]

MPCP pracuje ve dvou módech. Inicializační (discovery) a normální mód. V inicializačním módu OLT ve vyhrazeném intervalu posílá GATE zprávy (s příznakem discovery v poli *Number of grants/Flags Fields* a s všesměrovou adresou – pole *Destination Address*). Touto zprávou OLT oznamuje začátek a trvání inicializačního časového slotu, zpráva dále nese časovou značku. Na tuto výzvu smí odpovědět pouze neregistrované ONU jednotky. ONU jednotka v daném čase vyšle informační zprávu REGISTER_REQUEST. OLT si ze zprávy převezme MAC adresu jednotky a vy-

¹Formát řídicích zpráv přesahuje obsah tohoto textu. K nahlédnutí viz [4].

²Úplná struktura GATE a REPORT zpráv je v části 2.3.1.

počítá *RTT* (Round Trip Time) zpoždění. Poté vyšle REGISTER zprávu a GATE zprávu pro konkrétní ONU. Ta odpoví v čase definovaném v přijaté GATE zprávě potvrzující zprávou REGISTER_ACK. V normálním režimu ONU vyčte z přijaté GATE zprávy (již obsahující cílovou adresu dané ONU) čas začátku grantu a délku jeho trvání. Vynuluje svoje hodiny a čeká na začátek grantu. V každém grantu vyšle jednu informační REPORT zprávu s časovou značkou. OLT v každém cyklu kontroluje zpoždění přenosu *RTT*. Pokud hodnota *RTT* přesáhne určitý nastavený práh, OLT usoudí, že ONU již není synchronizována a nepřiděluje jí další granty až do následujícího inicializačního módu, kde ONU se musí znovu registrovat. Více o protokolu MPCP a s ním spojené problematice viz [6], [4].



Obr. 1.3: Struktura standardního rámce v EPON.

Struktura rámce

V EPON jsou pro přenos dat využívány standardní Ethernet rámce definované dle IEEE 802.3. Změnou prošlo jediné pole, a to preamble (záhlaví). Standardní záhlaví má velikost 8 B. Bajty 1–7 obsahují střídající se jedničky a nuly pro synchronizaci. Zbývající bajt nese pole SFD (Start of Frame Delimiter) pro odlišení začátku rámce. Změněné záhlaví je zobrazené na obr. 1.3. Délka zůstává shodná 8 B. Ke změnám došlo pouze v některých bajtech. Přesněji ve třetím a šestém až osmém. Ostatní bajty zůstávají nezměněny. Nesou tedy hodnoty $(55)_{\text{hex}}$. Význam nově přidávaných polí je následující.

- **SLD** (Start of LLID delimiter) – využíváno příjemci pro lokalizaci polí *LLID* a *CRC8*. Nese hodnotu $(5D)_{\text{hex}}$.
- **LLID** (Logical Link Id – logical link ID. Identifikace logické linky. Pole je využíváno k identifikaci MAC rozhraní při emulacích. Více dále v textu.
- **CRC8** (8 b Cyclic Redundancy Check) – obsahuje 8 b CRC hodnotu. Hodnotou je součet modifikovaných polí záhlaví.

Zbývající pole v rámci mají standardní význam. Zdrojová a cílová fyzická adresa, délka nebo typ (u EPON vždy typ). Data a výplň mají standardní délku 46–1500 B. Následuje pole *FCS* (Frame Check Sequence), které obsahuje kontrolní součet (CRC) dat celého rámce. [4]

Emulace bod–bod a bod–více bodů

EPON podporuje tři typy emulací. Bod–bod, bod–více bodů a jejich kombinaci. Při emulaci bod–bod musí být před vrstvou MAC implementována podvrstva pro PtP emulaci. OLT musí být vybaveno N MAC rozhraními, kde N je počet ONU jednotek. PtP podvrstva označí každý procházející rámec identifikátorem MAC rozhraní LLID. Rámec je poté doručen do všech ONU, ale pouze onu se stejným LLID jej přijme. Rámec se tedy zahazuje již na PtP vrstvě ONU jednotky. Ve vzestupném směru ONU vkládá LLID do záhlaví každého rámce. PtP podvrstva OLT poté dle LLID předá rámec konkrétnímu MAC rozhraní. Z pohledu MAC vrstvy se tedy zdá, jakoby komunikace probíhala dle schématu bod–bod, protože ONU, jimž rámec nepatří, jej zahazují. Pro přímou komunikaci mezi ONU jednotkami lze nad MAC vrstvou v OLT přidat vrstvu bridge. Tento způsob přenosu je nevýhodný při broadcastovém nebo multicastovém přenosu vysokého objemu dat. Sítí se poté šíří vysoký počet stejných kopií jedné dat. Například pro šíření videa je tedy tato emulace nevhodná.

Při emulaci bod–více bodů (SME – Shared-Medium Emulation) jsou rámce vyslané z OLT přijaté ve všech ONU. Rámce obsahují všesměrový identifikátor LLID. Ve směru směrem od účastníka OLT všechny přijaté rámce vysílá zpět opačným směrem. ONU kontroluje, zda vyslaný rámec nemá stejné LLID jako to, se kterým jej vyslala. Jednotka OLT obsahuje pouze jedno MAC rozhraní. Vrstva bridge v tomto případě není potřeba. Tento způsob odstraňuje nevýhodu PtP emulace při multicastových přenosech. Na druhou stranu všechna data ve směru od účastníka jsou odesílána zpět v opačném směru a plývají tak přenosovými kapacitami v sestupném směru. Což je při ostatních datových přenosech nevyhovující.

U vzájemné kombinace emulací OLT obsahuje $N + 1$ MAC podvrstev. Toto řešení odstraňuje nevýhody každého z řešení. Každá ONU jednotka musí obsahovat podvrstvu pro každý typ emulace. Vyšší vrstva poté rozhodne, který způsob emulace bude použit. [6]

Bezpečnost

V klasických PtP sítích, kde spolu komunikují vždy jen dvě stanice, jsou bezpečnostní hrozby mírně odlišné než u pasivních optických sítí. Protože data šířená ve

směru sestupném mohou přijímat všechny koncové jednotky ONU, je zde potenciální možnost útoku. Důraz na bezpečnost přenášených informací se klade zejména na podnikové půdě, kde je únik informací mnohdy kritický. Protokol EPON zabezpečení sám o sobě nedefinuje. Musí jej zajistit výrobce. Následující typy útoků jsou pro EPON a pasivní optické sítě obecně typické.

- **Odposlech dat** – ONU jednotky přijímají všechna data v sestupném směru. Je-li útočníkem ONU jednotka nastavena do tzv. promiskuitního módu, nefiltruje přijaté zprávy dle svého LLID identifikátoru, ale přijímá všechny zprávy přenášené v tomto směru. Útočník tak monitoruje kompletní provoz v síti ve směru od OLT k účastníkovi. Velice nebezpečné na tomto útoku je to, že jej nelze identifikovat ze strany OLT. Útok totiž nijak nenarušuje chod sítě.
- **ToS (Theft of Service)** – útočník ukradne identitu jiného účastníka v síti. Útočník během auto-discovery módu získá MAC adresu oběti a poté se vysláním falešných REGISTER zpráv vydává za oběť. Útočník musí upravovat všechny hlavičky rámců, které vysílá ve směru vzestupném. Do hlaviček vkládá nové LLID, MAC adresu a nově vypočítané kontrolní součty CRC. Kvůli znalosti přidělených časových grantů musí útočník provádět i odposlech v sestupném směru např. pomocí předešlé metody. OLT může jen těžko detekovat, že se koncová jednotka vydává za jinou.
- **Odmítnutí služby (DoS – Denial of Service)** - spočívá v jednoduchém odstavení uživatelem požadované služby. Útok DoS lze provést i na fyzické vrstvě. Útočník do optického vlákna vysílá ve směru od účastníka laserový paprsek s dostatečným výkonem a se správně zvolenou vlnovou délkou. Tím odstává veškerou vzestupnou komunikaci, což vede k reinicializaci celé sítě. Hlavní hrozbou spojenou s DoS útokem v EPON je, že útočník vysílá do sítě modifikované REPORT zprávy, útok se odehrává na vyšší vrstvě. Zprávy obsahují požadavky na přidělení velké šířky pásma od OLT. OLT přiděluje granty dynamicky a pokud nemá nastavené maximální okno pro velikost časového slotu pro jednu ONU jednotku, přidělí všechny síťové prostředky konkrétní ONU. Ostatní ONU jednotky tak nedostávají dostatečné časové sloty pro přenos dat ve sdíleném vzestupném směru komunikace. Toto opět vede k zahlcení celé sítě.

Řešením bezpečnostních rizik je šifrování dat a autentizace ONU jednotek i účastníků. Šifrování se provádí pomocí protokolu AES s různou délkou klíče v obou směrech komunikace. Bezpečnostní otázkou je však bezpečné předání klíče z OLT do ONU jednotek. Klíče je také nutné v pravidelných intervalech obměňovat. Zpravidla

bývají šifrovány pouze uživatelská data, což útočníkovi dává možnost odposlouchávat MAC adresy a LLID identifikátory. Na základě těchto informací může analyzovat provoz v síti atd. Pro dosažení vyšší bezpečnosti je tedy nutné šifrovat celé MAC rámce kromě pole preamble a FCS. V záhlaví je údaj LLID, dle kterého ONU jednotky filtrují sestupný provoz a ten nesmí být šifrován. Zabezpečení je možné přenechat vyšším vrstvám, což ovšem navyšuje složitost celé sítě a není to proto příliš vhodné řešení.

Autentizaci je nutno provádět na dvou úrovních. Autentizace ONU jednotky a autentizace uživatelů. Autentizace ONU z důvodu neoprávněného přístupu ke službám sítě a autentizace uživatelů kvůli ochraně před neoprávněným přístupem k ONU, kterou může sdílet více uživatelů. ONU jednotky jsou autentizovány v inicializačním módu MPCP protokolu (auto-discovery). Autentizace probíhá pomocí RADIUS (Remote Authentication Dial In User Service) serveru. Výzva k autentizaci probíhá poté, co OLT zašle REGISTER_REQUEST zprávu. Poté se musí ONU autentizovat u RADIUS serveru a následně obdrží od OLT jednotky REGISTER zprávu. Dále pokračuje inicializační mód stejně. [3], [1]

Vzhledem k výše popsaným rizikům musí projektant sítě zvážit všechna bezpečnostní rizika a zvolit vhodné řešení. Pasivní optické sítě nejsou úplně vhodnou volbou pro připojení institucí, jako jsou banky, armádní sektor, atd., kde je bezpečnost dat na prvním místě. V těchto na bezpečnost náročných odvětvích se zdá lepším řešením některá z PtP architektur.

1.2.2 10GEPON

Pasivní optická síť 10GEPON (IEEE 802.3av) vychází z předchozí varianty EPON dle standardu 802.3ah (byla standardizována v roce 2009). V mnohých základních vlastnostech se technologie shodují. 10GEPON ovšem řeší problémy, které nebyly při návrhu EPON v roce 2004 dotaženy do konce. Tyto problémy se objevily až při nasazení technologie do praxe.

10GEPON také pracuje s přenosem Ethernet rámců. Ke změnám došlo u jistých parametrů, jejichž srovnání je v tab. A.1. Navýšena byla přenosová rychlost. Změnou prošly útlumové třídy, vlnové délky. Zabezpečení FEC je nyní povinné. Nová varianta je však plně zpětně kompatibilní s variantou EPON. Lze ji tak aplikovat na již vybudovanou přístupovou síť. Obě technologie mohou koexistovat zároveň v jedné pasivní optické síti. Je-li OLT modulární, vymění se jen potřebné karty. Stejně tak lze vyměnit jen určité ONU koncové jednotky. Nově také 10GEPON přichází s asymetrickými přenosovými rychlostmi. Rychlosti ve směru vzestupném a sestupném se tedy liší. Konkrétně je poměr rychlostí 10/1 Gbps. Stejně tak lze využívat i symetrické rychlosti v obou směrech stejné 10/10 Gbps. Asymetrická varianta

šetří náklady sítě a je vhodná do sítí s převládajícími datovými přenosy ve směru sestupném (např. síť typu FTTH). Data jsou povinně zabezpečena metodou opravného kódování FEC (Forward Error Correction). Opravu zajišťuje Reed-Solomonův kód RS(255, 223). Redundance kódování se snižuje z 20% na 3%. Původní kódování 8b/10b bylo nahrazeno schématem 64b/66b. Byla zvolena větší podpora útlumových tříd, což poskytuje vyšší variabilitu při volbě překlenutelného útlumu.

Kvůli zlepšení provozuschopnosti obou variant v jedné přístupové síti byly přidány další vlnové délky pro oba směry přenosu. Díky tomu lze technologie zcela odlišit v jedné síti. Ve směru od účastníka jsou signály odděleny pomocí časového multiplexu TDM. Navíc se v závislosti na útlumové třídě pro symetrickou variantu (PR), či asymetrickou variantu (PRX) pracuje ve dvou pásmech vlnových délek. Ve směru od OLT jsou signály rozlišeny pomocí rozdílných vlnových délek pomocí vlnového multiplexu WDM. Vlnové délky využívané jednotlivými technologiemi jsou uvedeny v tab. A.1, která je umístěna v příloze A. U sítě 10GEPON tedy dochází k dvojímu dělení signálů. Nejprve časové dělení optických signálů technologií 10GE-PON a EPON a v další fázi k časovému dělení grantů (časových slotů) pro jednotlivé koncové jednotky. Kvůli dvojímu dělení byly pozměněny řídicí zprávy i některé procesy. V režimu objevování byla upravena zpráva GATE. Bylo zde přidáno pole Discovery Information (inicializační informace) o délce 16 b. Zde jsou přenášeny informace o zvolené přenosové rychlosti atd. Také při registraci ONU musela být v informační zprávě přidána položka pro přenos těchto informací. Jednotka optického linkového zakončení vysílá inicializační zprávy pro rychlosti 1 Gbps i 10 Gbps. [10]

2 NÁVRH MODELU

Cílem diplomové práce bylo vytvořit funkční model PON v simulačním nástroji OPNET Modeler. Pro model PON byl zvolen standard EPON (IEEE 802.3ah), zejména z důvodu četnosti použití ve skutečných optických přístupových sítích oproti ostatním standardům. Dalším důvodem je také to, že standard funguje na principu přenosu Ethernetových rámců, tudíž není třeba převádět protokoly mezi jednotlivými částmi sítě. Nyní již i značná část transportních sítí funguje na protokolu Ethernet a drtivá většina lokálních sítí také. Například konkurenční řešení GPON nabízí přenos pomocí modifikovaných ATM rámců, do kterých se poté balí samotná data komunikačního protokolu vyšších vrstev. V neposlední řadě byl EPON zvolen také kvůli budoucnosti standardu, kdy už je vytvořena další varianta 10GEPON, která disponuje přenosovou rychlostí 10 Gbps. V praktických aplikacích tedy nebude problém s přechodem na novější variantu protokolu, a tím pádem i vyšší rychlosti. V první části kapitoly bude popsán simulační nástroj, ve kterém byl celý model vytvořen a dále pak bude uveden samotný popis vytvořeného modelu.

2.1 OPNET Modeler

Simulační software OPNET Modeler slouží pro návrh, simulaci a analýzu síťových protokolů, zařízení a aplikací. Uživatel může analyzovat simulované síťové scénáře a porovnávat vlastnosti pro různá nastavení vybraných atributů. OPNET Modeler je objektově orientovaný, tzn., že systém v něm vytvořený se skládá z objektů, kde každý má nastavitelné parametry. Modely jsou hierarchické, napodobující strukturu skutečných komunikačních sítí. Další výhodou je, že se spousta činností při vývoji odehrává v grafickém prostředí v některém ze zabudovaných editorů. Vestavěné knihovny mají otevřený zdrojový kód, tudíž uživatel může jeho modifikací upravovat chování daných zařízení. Pro popis programu bylo čerpáno z lit. [11].

Nástroje pro specifikaci modelů se nazývají editory a program jich obsahuje celou řadu. V editorech se pracuje s objekty, které reprezentují komponenty modelu, jeho strukturu a vlastnosti. Každý editor obsahuje specifický soubor objektů a operací, které modelují požadované vlastnosti.

2.1.1 Vrstvy modelu

Vrstvy respektive úrovně modelu lze popsat také jako jednotlivé prostředí pro modelování, kde každé prostředí pokrývá jednu úroveň hierarchického modelu. OPNET Modeler využívá prostředí síťové, uzlové, procesní a externí systémové.

Síťová vrstva

Zabývá se modelováním síťové topologie. Pracuje se zde v editoru projektu, ten je k vidění na obr. 3.1. Komunikační entity se nazývají uzly. Uzly jsou popsány modely tvořenými v editoru uzlů. Uzly se propojují pomocí linek, které jsou definovány v editoru linek. Mohou komunikovat i bezdrátově. Editor projektu poskytuje také geografický kontext pro vývoj modelu sítě. Modely lze tvořit nad mapovým podkladem pro modelování vzdáleností ovlivňujících např. vlastnosti a chování linek.

Uzlová vrstva

Je určena pro modelování komunikačních zařízení. V názvosloví OPNET Modeleru se nazývají uzly a popisují zařízení, jako jsou směrovače, přepínače, uživatelské stanice, servery, atp. Na této úrovni se pracuje v editoru uzlů (obr. 2.4, 2.9), kde je chování modelovaného zařízení popsáno menšími bloky, nazývanými moduly. Moduly lze rozdělit na dva typy. Jedny lze ovlivňovat pouze pomocí vestavěných parametrů, do této skupiny spadají například vysílače a přijímače (nastavení propustnosti, zpoždění, atp.). Druhou skupinu tvoří moduly nazývané procesor, fronta a externí systémy. Tyto jsou vysoce programovatelné. Moduly se propojují třemi typy spojů. Nazývané v originále jako packet stream, statistic wire a logical association. Packet streams dovolují přenášet formátované zprávy nazývané pakety, definované v editoru formátu paketu.

Procesní vrstva

Na této vrstvě se pracuje v editoru procesu (obr. 2.12) a programují se zde moduly fronty a procesoru. Vkládají se zde jednotlivé bloky nazývané procesy představující stavy ve stavovém diagramu, a spojují se přechody. V jednu chvíli smí být vykonáván pouze jeden stav (proces). Do procesů se poté vkládá samotný kód určující jejich chování. Procesy reagují na přerušení, což jsou události řízené procesy. Přechodům lze přiřadit podmínky pro přechod a funkce vykonávané při přechodu. Procesy jsou vyjádřeny v programovacím jazyku Proto-C, který je designován pro vývoj protokolů a algoritmů. Proto-C je založen na kombinaci stavových diagramů, knihovně příkazů a základních vlastnostech jazyka C nebo C++.

Při tvorbě modelu v této práci byly jednotlivé uzly sítě tvořeny na úrovni procesní a uzlové vrstvy. Poté v editoru projektu byla vytvořena topologie sítě a proběhlo ladění a simulace. Dále byly využity editory linek, editor paketů a editor ICI formátu.

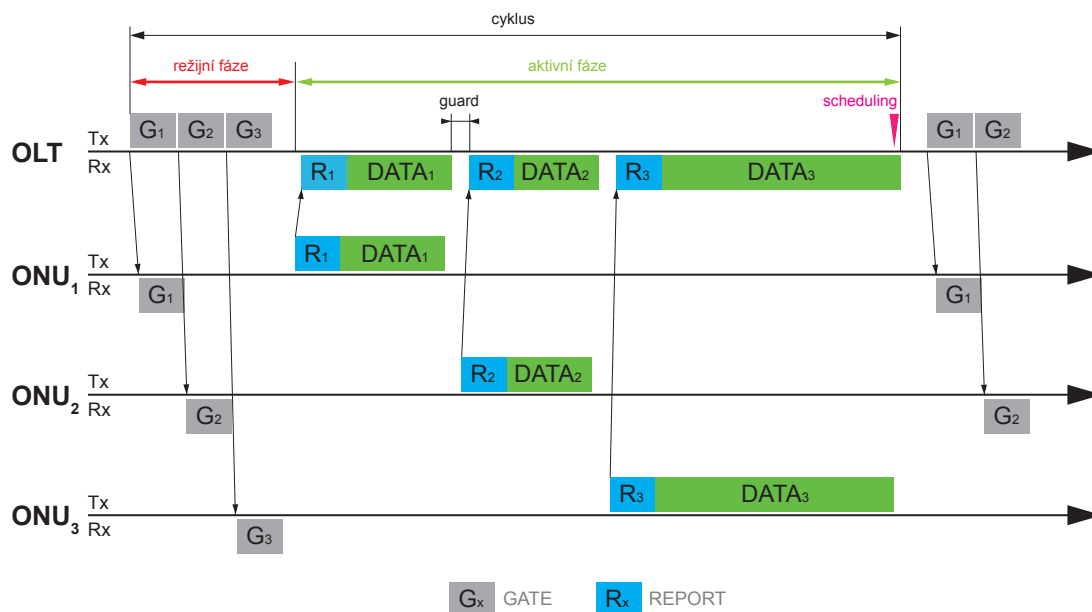
2.2 Vlastnosti modelu

OPNET Modeler neposkytuje možnost modelovat optické sítě pomocí zabudovaných modulů. Proto byly v této práci vytvořeny všechny vrstvy modelu vlastní. Model PON sítě je vytvořen se statickým počtem koncových ONU jednotek. V síti tedy nebude probíhat mód objevování (discovery mode), během kterého by OLT muselo zjistit celkový počet jednotek a dobu jejich zpoždění. Dále OLT nemusí kontrolovat, zda se neodpojily, či připojily další ONU jednotky. Řídící zprávy REGISTER_REQUEST, REGISTER a REGISTER_ACK proto nebyly v modelu vytvořeny. Pro řízení normálního módu (normal mode) jsou potřeba jen dvě řídicí zprávy GATE a REPORT. Jako přístupová metoda u protokolu MPCP ve vzestupném směru se využívá TDMA. Každá koncová jednotka tedy dostane přidělený určitý časový úsek, po který může vysílat svoje data – grant. Řídící GATE zpráva slouží pro zasílání informací z OLT, přenáší se zde čas začátku vysílání, délka vysílání atp. REPORT zprávou jednotka ONU informuje OLT o stavu své fronty (nebo několika front). Přístup ONU jednotek tedy řídí tyto dvě zprávy.

2.2.1 Komunikace MPCP v modelu

Řídící komunikace MPCP pro jeden cyklus je zobrazena na obr. 2.1 OLT nejprve vyšle GATE zprávy všem ONU jednotkám. Každá ONU vyčte z GATE potřebné informace, a dle nich určí začátek svého grant intervalu a dobu jeho trvání. V době, ve které OLT vysílá GATE zprávy není využit vzestupný směr komunikace, to je nutné z důvodu režie - režijní fáze. Druhá fáze komunikace se nazývá aktivní fáze. Zde ONU jednotky již vysílají data v přidělených časových slotech. V každém slotu je odeslána také jedna REPORT zpráva, kde se oznamuje velikost fronty pro následující plánování. Mezi každým grantem je ochranný časový interval nazývaný guard. Také před začátkem každého nového cyklu je ochranný interval. Plánování probíhá na konci aktivní fáze.

Plýtvání síťovými prostředky v režijní fázi je možné eliminovat rozdělením plánování pro dvě logické skupiny ONU jednotek. ONU jednotky je nejprve nutno rozdělit do dvou logických skupin, např. skupina X a Y. Příslušnost skupin nezáleží na topologii a jiných fyzických vlastnostech sítě. Plánování (scheduling) pro skupinu X probíhá v aktivní fázi skupiny Y. Poté – stále v aktivní fázi Y – se vyšlou GATE zprávy skupiny X. Následuje aktivní fáze skupiny X a probíhá plánování grantů a zaslání GATE zpráv pro skupinu Y. Aktivní fáze X se překrývá s režijní fází Y, a naopak. Odstranění režie tímto způsobem není v modelu implementováno.



Obr. 2.1: Řídící komunikace MPCP v modelu.

2.2.2 Plánování grantů

OLT jednotka byla vyvinuta tak, aby umožňovala přidělování časových slotů staticky nebo dynamicky. Při statickém módu dostává každá koncová ONU jednotka stejně dlouhý časový slot – grant. Velikost jednoho grantu je nepřímo úměrná počtu ONU jednotek připojených k síti. Dochází zde k plýtvání síťovými prostředky, protože jednotky, které nemají ve své vyrovnávací frontě data k odeslání zbytečně zabírají v cyklu časový interval, který není nijak využit.

Dynamický mód na základě informací z REPORT zpráv vypočítává pro každou ONU jednotku velikost grantu. Pokud by jedna nebo více ONU měly přeplněné vyrovnávací fronty, OLT by jim přidělovalo granty, které by zabraly téměř celou kapacitu cyklu. Docházelo by k monopolizaci těchto jednotek na úkor ostatních. Takové chování sítě je nepřijatelné. Proto byl navržen a implementován algoritmus maximálního okna. Velikost grantu tak nepřekročí určitou nastavenou mez. V OLT je také implementována funkce, která kontroluje, zda byly doručeny REPORT zprávy od všech připojených ONU. Pokud ne, je ONU jednotce přidělen grant, jehož délka odpovídá časovému intervalu nutnému pro odeslání REPORT zprávy. Detailnější popis algoritmů bude uveden v podkapitole 2.3.4.

2.2.3 Podpora kvality služeb

Pro zajištění kvality služeb bylo do ONU jednotky přidáno více front. V navrženém modelu ONU jednotka obsahuje osm front. Každá fronta je obsluhována s jinou prioritou. Tento mechanismus splňuje základní požadavky na dodržení kvality služeb (QoS) v síti. Při zavedení více front do jedné ONU je možno přidělenou šířku pásma frontám plánovat hierarchicky (tzv. intra-ONU scheduling), nebo přímo (inter-ONU scheduling).

Při **intra-ONU** plánování se pro každou ONU vysílá jedna REPORT zpráva, která říká, jak velký grant ONU jednotka obdržela v daném cyklu. V ONU je další plánovač, který jednotlivým frontám přiděluje části grantu. Přidělování probíhá dle priority konkrétní fronty. Priorita fronty je dána váhou. V GATE zprávě se přenáší velikost každé fronty, ale OLT velikost grantu plánuje pro součet těchto velikostí, nehledě na jejich váhy. Samotné vyprazdňování front bude popsáno dále. V režimu **inter-ONU** plánování se pro každou frontu z OLT vysílá samostatná GATE zpráva. Výhoda tohoto řešení je, že ONU jednotky nemusí dosahovat vysokého výpočetního výkonu. Nevýhoda spočívá v příliš vysoké režii sítě. Každá fronta má v tomto případě vlastní grant, který musí být ohraničen ochranným intervalem. ONU musí odeslat v každém grantu REPORT zprávu pro všechny aktivní fronty. Což vede k navyšování režie sítě. Následující vzorec vyjadřuje výpočet doby trvání režie pro jeden cyklus.

$$overhead = \left(\frac{GATE + REPORT}{Bandwidth} + guard \right) \cdot N \cdot n, \quad (2.1)$$

kde *Bandwidth* je šířka přenášeného pásma. *N* je počet ONU jednotek. V případě inter-ONU je *n* rovno počtu front, v případě intra-ONU je vždy $n = 1$ (přenáší se jedna GATE a jedna REPORT zpráva). Ostatní proměnné mají stejný význam jako v předešlém textu. Představme si, že je v síti připojených 32 ONU jednotek a každá obsahuje osm aktivních front. V případě inter-ONU plánování by pro všechny fronty musela být zaslána samostatná GATE zpráva. Bylo by jich zasláno 256. Dosazením do vzorce 2.1 zjistíme, že pro inter-ONU plánování režie činí $257 \mu s$. Pro intra-ONU plánování režie vychází na $33 \mu s$. V modelu je implementováno intra-ONU plánování.

Obsluha jednotlivých front v ONU může probíhat dle různých schémat. Striktní obsluha front je výhodná ve své jednoduchosti. Fronty se postupně obsluhují dle své priority. Tato metoda trpí problémem upřednostnění front z vyšší třídy a narůstáním zpoždění zpráv s nižší prioritou. Nejzastší případem je, že celý grant využije jen fronta s nejvyšší prioritou na úkor ostatních. V modelu byl navržen způsob obsluhy front nazývaný „weighted fair queueing“. Z názvu plyne, že fronty jsou obsluhovány spravedlivě na základě hodnoty vah. Přesný popis této funkce je uveden v následující kapitole.

2.3 Entity modelu

Čas je při simulaci měřen pomocí globálních hodin v OPNETu. Aktuální čas simulace lze zjistit pomocí funkce `op_sim_time()`, jejíž výstupní parametr je hodnota času simulace v sekundách. Každé přerušení se stanovuje vzhledem k aktuálnímu času simulace a offsetu daného přerušení. Díky globálním hodinám v simulačním nástroji není nutné entity sítě mezi sebou synchronizovat. Všechny události se řídí dle času simulace.

Při tvorbě modelu byly nejprve vytvořeny rámce GATE a REPORT. Poté byl vytvořen model linky, který simuluje parametry optického vlákna. Dále byly vytvořeny ostatní stavební prvky EPON sítě, které byly postupně vyvíjeny. V následujícím textu budou popsány jednotlivé entity sítě a jejich funkce.

2.3.1 Datové jednotky v MPCP

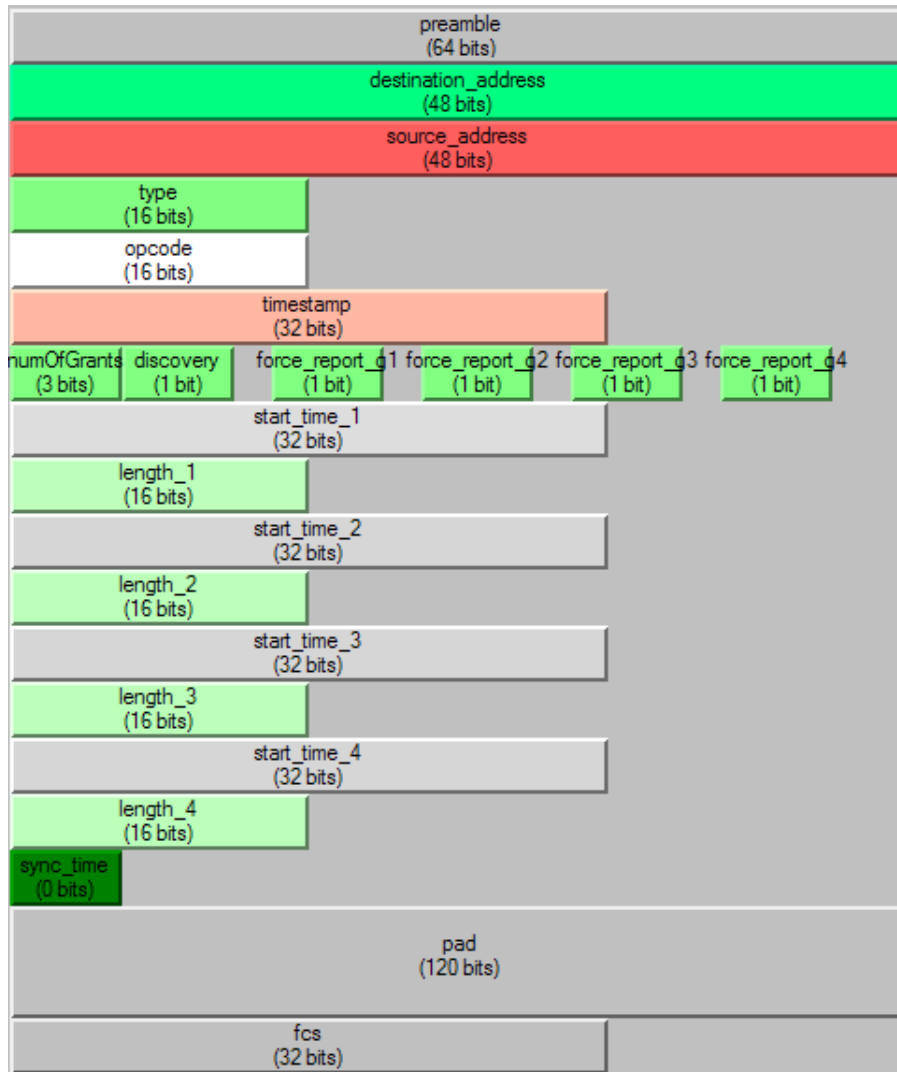
Datové jednotky vytvořené pro model EPON jsou vytvořeny v souladu s IEEE 802.3ah standardem. Některá pole nebudou při simulaci využívána, ale jsou v rámci definována z důvodu shody se standardem. V modelu jsou využívány dvě informační zprávy. GATE a REPORT, jež jsou popsány níže. Minimální velikost řídicích zpráv v protokolu MPCP je 64 B bez záhlaví. Pokud pole ve zprávě nejsou využita, doplní se v poli *Pad* zpráva samými nulami na tuto velikost.

GATE

GATE zpráva slouží pro informování ONU o velikosti přiděleného grantu a začátku jeho vysílání. GATE zpráva se využívá v normálním i objevovacím módu, tyto režimy jsou rozlišeny jedním bitem v poli *Number of grants/Flags Fields* (počet grantů/flags). Zpráva se přenáší výhradně v sestupném směru. Datové jednotky byly vytvořeny v editoru formátu paketu. Formát řídicí zprávy GATE je na obrázku 2.2. Datový rámec obsahuje následující pole.

- **Preamble** (64 b) – preambule pro standard EPON. Detailní popis struktury hlavičky a obecného EPON rámce je v části 1.2.1. V simulaci nebude toto pole využíváno. Data jsou pro zjednodušení filtrována dle MAC adres namísto LLID identifikátorů, které se přenášejí právě v preambuli.
- **Destination address** (48 b) – cílová adresa. Standardní pole v záhlaví Ethernet rámců. Nese hodnotu MAC adresy ONU jednotky, které zpráva náleží. Při simulaci budou pro jednoduchost zdrojového kódu využívány fyzické MAC adresy uzlů jako celá čísla 1, 2, 3, atd.

- **Source address** (48 b) – zdrojová adresa. Standardní pole v záhlaví Ethernetových rámců. MAC adresa OLT je v simulaci nastavena na 99.
- **Length/Type** (16 b) – délka/typ. Opět součást standardní hlavičky rámců. V protokolu EPON se výhradně používá *Type*. Pole *Length* je pozůstatek ze standardu pro rámec Ethernet I, který se dnes téměř nepoužívá. MPCP zprávy mají označení *Type* $(8808)_{\text{hex}}$. Tato hodnota je v poli nastavena jako výchozí.
- **Opcode** (16 b) – určuje typ MPCP zprávy. Pro GATE zprávu je opcode hodnota $(0002)_{\text{hex}}$. Hodnota je v poli pevně přednastavena.
- **Timestamp** (32 b) – časové razítko lokálního časového registru v OLT. Označuje každou zprávu aktuálním časem simulace. Pole je důležité pro vyhodnocování zpoždění při přenosu zpráv a výpočty *RTT*.
- **Number of grants/Flags Fields** (8 b) – obsahuje tři sub-pole. Ve vytvořeném paketu jsou pole vytvořena jako samostatná, pro jednodušší interpretaci a manipulaci s poli.
 - **Number of grants** (3 b) – udává počet grantů, které přiděluje ONU. Jejich počet může být v rozsahu 0–4.
 - **Discovery** (1 b) – určuje, v jakém módu je GATE zpráva posílána. 0 – normální mód. 1 – discovery mód.
 - **Force Report Grant 1–4** (1 b) – oznamuje ONU, zda je vyžadováno oznámení o stavu fronty zprávou REPORT.
- **Grant 1–4 Start time** (32 b) – pole určující čas začátku vysílání pro granty 1–4. Hodnota se udává v sekundách.
- **Grant 1–4 Length** (16 b) – délka grantů v sekundách. Každý grant má své vlastní pole.
- **Sync Time** (0 b) – Pole je využíváno jen v discovery módu pro synchronizaci. V simulaci nebude využito, proto je jeho velikost 0 b.
- **Pad** (120 b) – výplňové pole, určené pro vyplnění rámce, pokud by nedosahoval minimální velikosti rámce. V modelu není kontrolována minimální velikost přenášených rámců. Standard říká, že minimální velikost datové jednotky EPON je 64 B bez záhlaví (preamble), stejně jako u ostatních Ethernet sítí.
- **FCS** (32 b) – kontrolní součet. V simulaci se toto pole nevyužívá.



Obr. 2.2: Formát GATE zprávy.

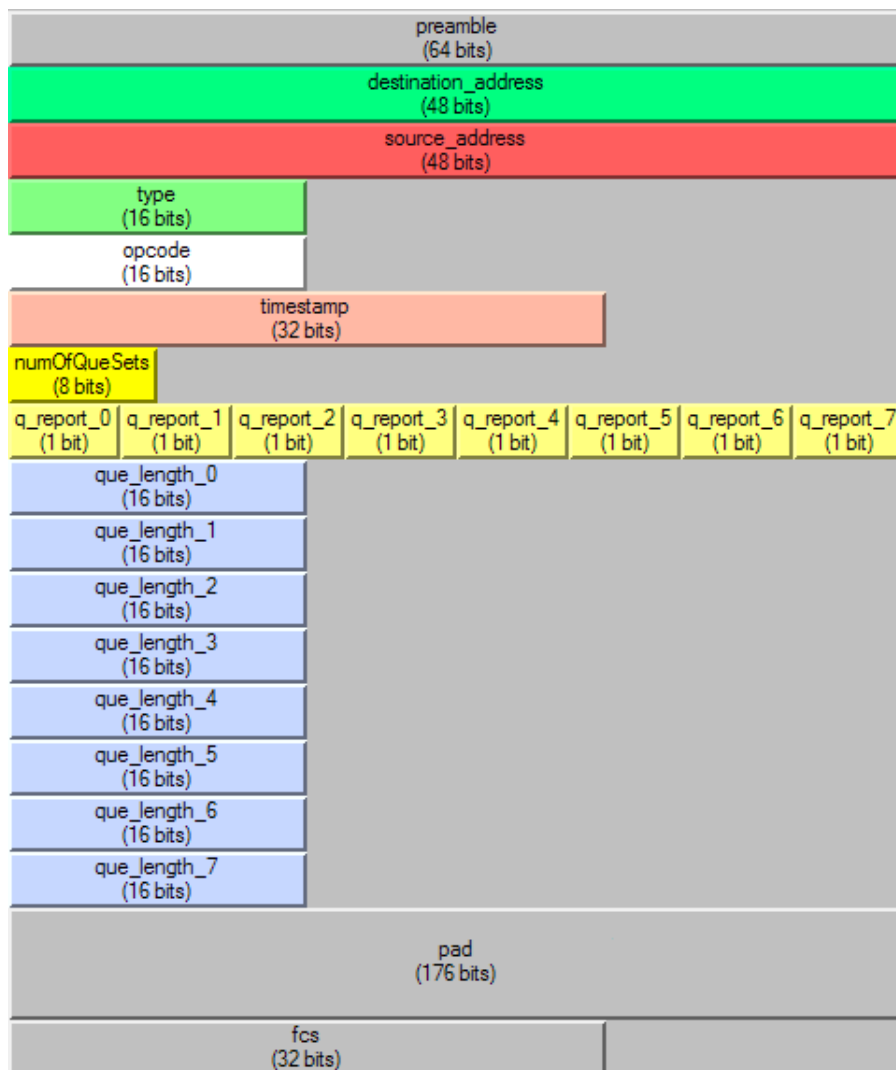
REPORT

Struktura datového rámce je na obr. 2.3. Pole Preamble, *destination address*, *source address*, *length/type* a *timestamp* jsou stejná jako ve zprávě GATE. Jejich popis je uveden v předchozí části textu. Zpráva REPORT se přenáší pouze ve směru vzestupném.

- **Opcode** (16 b) – určuje typ MPCP zprávy. Pro REPORT zprávu je *opcode* hodnota $(0003)_{\text{hex}}$. Hodnota je v poli pevně přednastavena.
- **Number of queue sets** (8 b) – určuje počet požadavků od jednotlivých front v aktuální REPORT zprávě. Rámec REPORT může obsahovat množinu n polí *Report bitmap* v kombinaci s poli *Queue length*.

- **Report bitmap** (8 b) - obsahuje sub-pole **queue 0–7 report**, která oznamují, které fronty jsou zaplněny a žádají o přidělení grantu v dalším cyklu.
- **Queue length 0–7** (16 b) – velikost front. Informace je platná k času uloženém v poli *timestamp*. Tato pole jsou v rámci přítomna pouze v případě, že je uložena hodnota true (1) v poli *report bitmap*. Ve vytvořeném rámci je použita pouze jedna kombinace polí *Report bitmap* a *Queue length*.

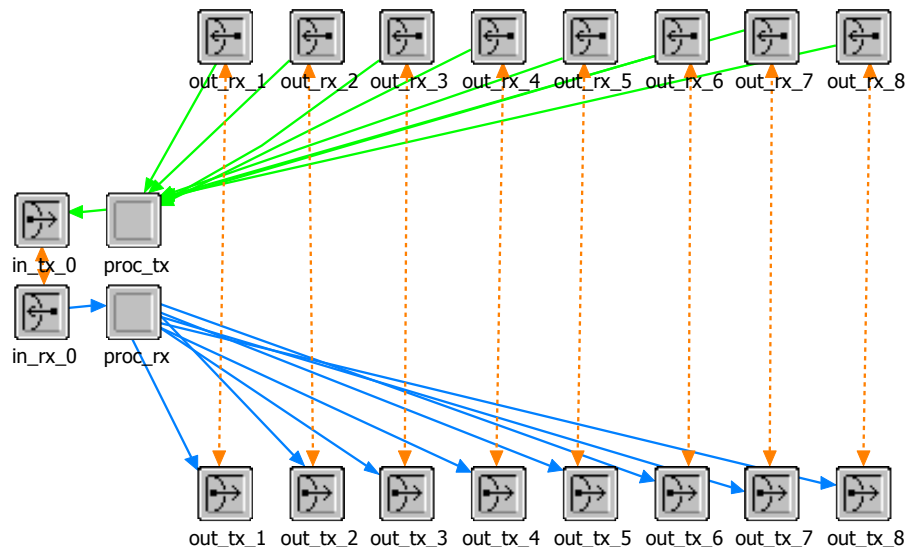
Zbývající pole *Pad* (má pouze jinou velikost výplni) a *FCS* jsou opět stejné jako v GATE zprávě.



Obr. 2.3: Formát REPORT zprávy.

2.3.2 Linka

Pro propojení síťových zařízení v simulované síti PON byla vytvořena vlastní linka. Jedná se o full duplex point-to-point linku. Hlavním parametrem linky je propustnost, která byla nastavena na 1 Gbps. Linka nemá v základu nastavenou nulovou chybovost BER (Bit Error Rate) a vykazuje nulové zpoždění přenosu dat. Tyto parametry mohou být nastaveny zvláště pro každou použitou linku až při tvorbě topologie sítě. Nastavením zpoždění by se simulovala různá délka konkrétních spojů a také rozdíl ve vzdálenosti ONU jednotek od splitteru, což je v praxi velice důležitý parametr. Pro různé délky by linka vykazovala různé zpoždění. BER je poměr chybně přijatých bitů ku celkovému počtu bitů. U optických vláken se BER pohybuje v rozmezí 10^{-9} až 10^{-12} . Zpoždění závisí na typu optického vlákna a na délce spoje.



Obr. 2.4: Pasivní optický splitter – model.

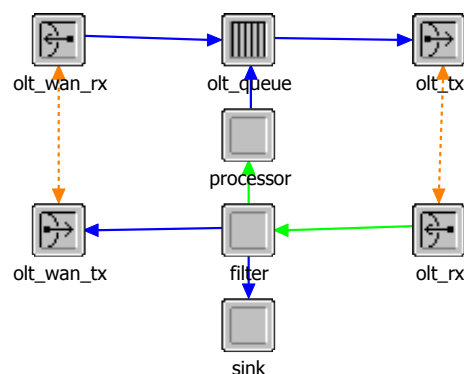
2.3.3 Splitter

Pasivní optický splitter má za úkol simulovat chování tohoto zařízení v praxi. Přijaté pakety na point-to-point přijímači *in_rx_0* rozešle na všechny point-to-point vysílače. Tuto proceduru řídí blok procesoru *proc_tx*. V opačném směru *proc_rx* přijímá pakety od všech přijímačů a vysílá je pomocí *in_tx_0*. Procesory obsahují jednoduché procesní modely, kde jsou vždy jen dva stavy *init* a *receive_send*, které se starají o funkci splitteru. Splitter je vytvořen pro dělicí poměr 1:8, ale může být jednoduchou úpravou rozšířen na 1:N. Model na uzlové vrstvě je na obrázku 2.4. Splitter

tím, že v modelu není úplně pasivní sám o sobě, vykazuje jisté zpoždění. To je způsobeno výpočty při kopírování paketů na jednotlivé vysílače. S tímto zpožděním je potřeba počítat při nastavování útlumu spoje mezi OLT a splitterem. Zpoždění se pohybuje v rozmezí 1–4 μ s. Hodnota je proměnná v závislosti na aktuálním datovém toku.

2.3.4 OLT

Primárním úkolem OLT je v každém cyklu vypočítat velikost grantu pro každou ONU jednotku. Počet jednotek je staticky nastavený parametrem uzlu. Velikost přidělovaných grantů se počítá buď staticky nebo dynamicky. Ve statickém módu se pro všechny ONU nastaví shodná velikost grantu. V dynamickém módu se velikost vypočítá na základě požadavků zaslaných od ONU jednotek. Struktura OLT je na obr. 2.5. Fyzická adresa OLT je nastavena na 99, jak už bylo zmíněno, adresy jsou ve formátu celých čísel pro zjednodušení kódu. K OLT je možno přes připojit osm koncových jednotek.



Obr. 2.5: Model OLT jednotky.

Olt_rx, olt_tx, olt_wan_rx a olt_wan_tx

Originální komponenty v OPNETu point-to-point receiver a transmitter (přijímač a vysílač). Slouží k vysílání paketů z připojených paketových toků. Na vyšší úrovni v editoru sítě se na ně napojují linky propojující síťové entity. Nastavovaným parametrem byla propustnost (1 Gbps).

Sink

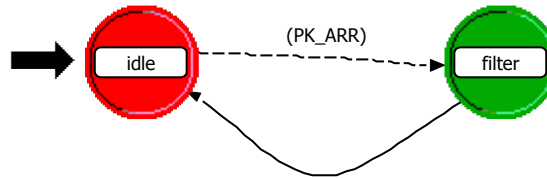
Sink je originální komponenta OPNETu. Jedná se o koncový bod toku paketů, přijaté pakety dealokuje z paměti. Blok nemá žádné parametry. Pouze zde lze nastavit

statistiky přijatých dat.

Výše popsané komponenty a jejich parametry jsou u všech entit stejné, proto již nebudou dále popisovány.

Filter

Filter rozhoduje, jak naložit s přijatým paketem. Ten může poslat do modulu processor (jedná se o REPORT), nebo do modulu sink/olt_wan_tx. Stavový model obsahuje dva stavy a je na obr. 2.6. *Idle* je počáteční stav a zároveň stav klidu. Do stavu *filter* se přejde při přerušení streamem paketů přijatých na olt_rx. Přerušení je označeno makrem *PK_ARR*. *Filter* pakety vyhodnocuje na základě typu (Ethernet nebo REPORT). Pokud se jedná o REPORT, jsou zkontrolována pole *type* a *opcode*. Pokud je vyhodnotí jako správné, odešle paket ke zpracování procesoru. V opačném případě posílá ostatní rámce do bloku sink/olt_wan_tx.



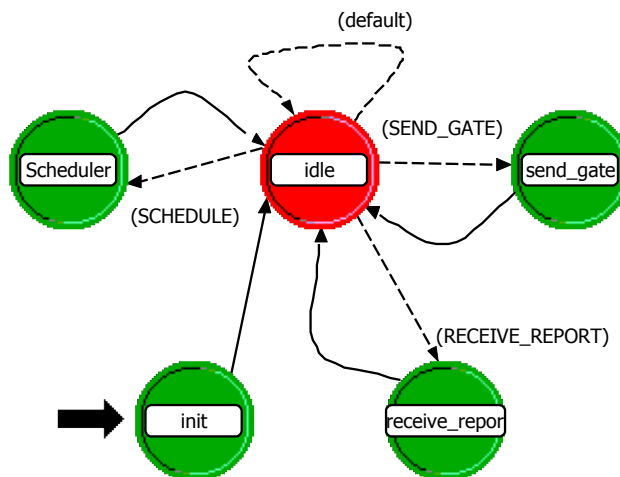
Obr. 2.6: Model procesů – filter

Processor

Procesor je nejdůležitější součástí v OLT. Zajišťuje získání informací o síti a řídí celé plánování grantů. V každém cyklu za tímto účelem vysílá GATE zprávy. Stavový diagram definující přechody mezi stavy v procesoru je na obr. 2.7. Úkoly vykonávané v jednotlivých stavech budou společně s implementovanými funkcemi popsány v následujícím.

Init – získává definované atributy objektu a inicializuje proměnné. Dále jsou zde nastaveny ofsety *schedule_offset* a *send_offset* a ochranné intervaly (*gate_len_guard* a *start_time_guard*). Je zde také definována velikost cyklu *cycle_size*. V prvním cyklu po inicializaci sítě se všem ONU jednotkám přidělí stejně velké granty. Velikost grantu se stanoví podle vzorce

$$grant_size_i = \frac{cycle_size}{N} - gate_len_guard, \quad (2.2)$$



Obr. 2.7: Stavový model processoru OLT.

kde N je počet aktivních ONU jednotek. Na konci vyvolá přerušení **SCHEDULE** pro přechod do stavu *Scheduler* a přerušení **SEND_GATE** pro odeslání GATE zpráv (přechod do *send_gate*). Tato přerušení mají offset nastavený tak, aby nejprve proběhlo plánování, a poté byly odeslány GATE zprávy. Systém do tohoto stavu během simulace už nepřejde. Po vykonání celého kódu systém přejde do klidového stavu *idle*.

Idle – klidový stav – nevykonává žádnou funkci. Ostatní stavy po vykonání jejich funkcí přecházejí do stavu *idle* a zde se čeká na další přerušení.

Scheduler – plánuje průběh každého cyklu. Pracuje ve dvou módech, které se nastavují atributem OLT uzlu. Statický mód, ve kterém je všem ONU přidělován stejně velký grant a dynamický mód, který přiděluje granty dle požadavků.

Statický mód vypočítává délku grantu stejně jako v inicializačním cyklu dle vzorce 2.2. Délka cyklu se nemění dle aktuálních požadavků sítě. OLT nedbá na informace v přijatých GATE zprávách. Ty slouží pouze pro kontrolu synchronizace, která není v modelu implementována.

Dynamický mód byl vyvinut z důvodu maximálního využití síťových prostředků. Algoritmus obsahuje několik funkcí, které chování sítě ještě zdokonalují. Chování scheduleru vyjadřuje vývojový diagram na obr 2.8. Ve stavu je nejprve kontrolováno, zda byl od všech ONU přijat REPORT. Pokud ne, je vložena do listu (*op_prg_list*) struktura, která má proměnnou nosící velikost požadavku nastavenou tak, aby grant v příštím cyklu byl dostatečný pro odeslání REPORTu z ONU (ze které se nepodařilo přijmout REPORT). Následuje výpočet délky grantů na základě oznámené velikosti fronty, která se zjišťuje v přijatých GATE zprávách. Tato data se načítají

z listů, které jsou plněny ve stavu *receive report*. Délka grantu se určuje dle vzorce

$$grant_size_i = \frac{\frac{queue_length_i}{rate}}{\frac{\sum_{j=0}^N queue_length_j}{rate}} \cdot cycle_size + gate_len_guard, \quad (2.3)$$

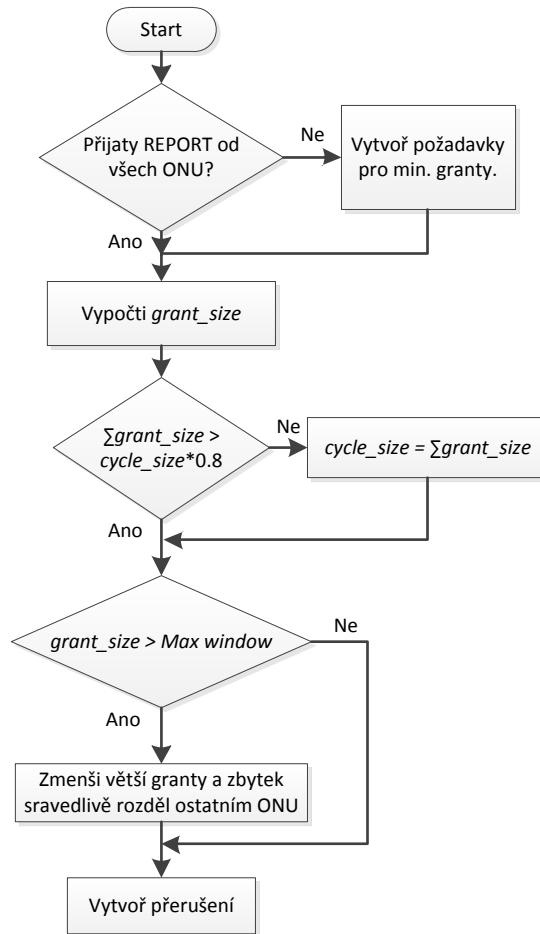
kde N je počet ONU a $rate$ je propustnost linky. Délka grantu v sekundách se určí jako procentuální poměr vůči celkovému součtu požadavků. Dále je prováděna kontrola, zda součet délek všech grantů není větší než určitý poměr velikosti celého cyklu. Pokud ano, tak je cyklus zmenšen na velikost součtu grantů. Tato funkce je vhodná zejména v době, kdy jednotky nemají data k odeslání a vysílají jen REPORT (např. v noci). Poměr velikosti cyklu je v modelu nastaven na 80 %. Následuje kontrola, zda velikost grantů nepřesahuje nastavenou velikost maximálního okna, pokud ano, je grant nastaven na velikost maximálního okna. Zbytek grantu je spravedlivě rozdělen ostatním ONU, ale pouze za předpokladu, že je čas pro vyprázdnění fronty větší než přidělený grant. Pokud žádná z ONU zbytek nevyužije, je opět přičten k původnímu grantu. Maximální okno je nastavitelný paramer. Nakonec jsou vytvořena dvě přerušování pro další kolo plánování (SCHEDULE a SEND_GATE).

Send_gate – do stavu se přechází při každém přerušování SEND_GATE vyvolaném v plánovači. Přerušování se vyvolá těsně po každém plánování. V každém cyklu jsou vyslány GATE zprávy pro všechny aktivní jednotky. Z linked-listu jsou vyčítány struktury, jejichž data se plní do polí GATE zprávy (*start time, grant length, destination address, number of grants*). Dále je nastavena hodnota aktuálního času simulace do pole *timestamp* a GATE zpráva se odesílá.

Receive_report – převezme z toku paketů paket, který byl ve filteru klasifikován jako REPORT zpráva. Data z polí *timestamp, source address* a *queue length* se vloží do proměnných sestavených do struktury, která se vkládá do listu, ze kterého jsou v příštím plánování načítány. Datový typ list a operace s ním spojené jsou definovány přímo v OPNETu.

2.3.5 ONU

ONU jednotka přijímá všechny data vyslaná z OLT. Na základě typu dat a jejich adresy se rozhodne, zda je zpracuje či zahodí/přepošle. V modelu ONU přijímá pouze GATE zprávy. Z nich si uloží časy začátku grantu a jeho délky. Pro každou ONU je potřeba v attributech nastavit její fyzickou adresu. Struktura ONU v editoru uzlu je na obrázku 2.9. Model ONU obsahuje osm front, kde každá zpracovává přijatá data s jinou prioritou. Fronty mají definovány třídy provozu. K rozlišení dat je pro zjednodušení využito připojení zdroje dat vždy na jiné PtP vysílač/přijímač označené *eth_rx_vlanX* a *eth_tx_vlanX*. V praxi by musel být využit klasifikátor paketů nebo zařízení přiřazovat do různých VLAN (Virtual Local Area Network).



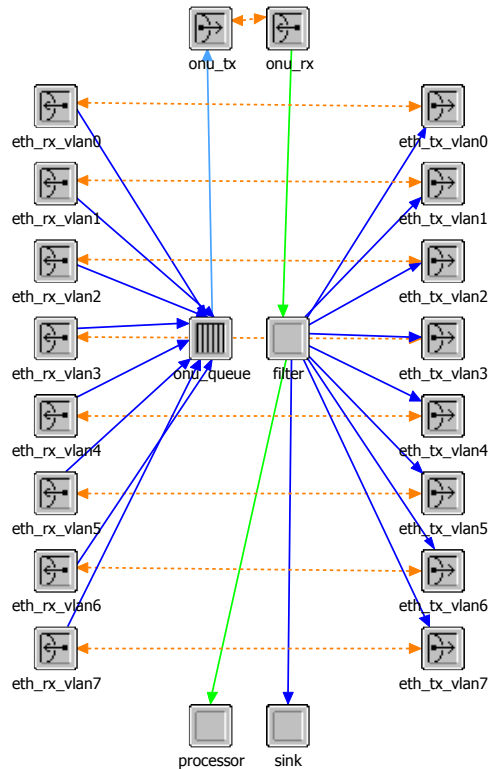
Obr. 2.8: Vývojový diagram dynamického módu přidělování grantů v OLT.

Filter

V případě ONU filter přijímá pouze GATE zprávy. Vyhodnocuje tedy, zda přijatá zpráva patří konkrétní ONU. Pokud ano, pře pošle přijatý paket do bloku procesor. Procesní model je na obr. 2.10. Stav *idle* je klidový stav, který čeká na příchozí paket. Pokud se jedná o GATE zprávu, tak se ve stavu *filter* vyhodnocují pole přijatého paketu *destination_address* a *type*. Pokud adresa odpovídá vlastní adrese a hodnota uložená v poli *type* je shodná s identifikátorem MAC rámců $(8808)_{hex}$, pře pošle se paket do procesoru, pokud ne, odešle se paket do bloku sink. V případě podpory sestupného provozu by se pakety pře posílaly ke konkrétním PtP vysílačům.

Processor

Procesor v ONU zajišťuje příjem GATE zpráv a nastavení přerušení pro začátek grantu.



Obr. 2.9: Model ONU

Init – inicializační a počáteční stav. Načtení proměnných a parametrů objektu.

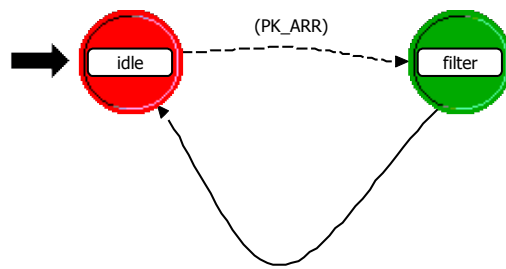
Idle – klidový stav. Čeká se zde na přerušení. Jedno přerušení způsobuje příchozí paket (GATE zpráva), toto přerušení se v modelu nazývá `ARR_PKT`. Druhé způsobuje self interrupt (lokální přerušení) vyvolané ve stavu `receive_gate`, nazývá se `SEND_REPORT`.

Receive_gate – přebírá GATE zprávu z datového toku (packet stream) od filtru. Vyčítá z jeho polí délku, začátek přiděleného grantu a časové razítko. Vyvolává lokální přerušení pro vytvoření REPORT zprávy a přechází do stavu `idle`. Přerušení je vyvoláno v čase startu grantu, od kterého se odečte offset pro zpracování REPORT zprávy.

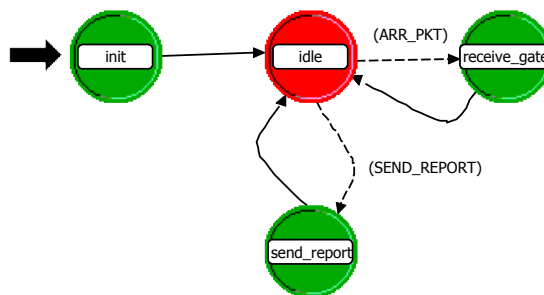
Send_report – Vyvolává dvě vzdálená přerušení. Obě jsou pro blok `onu_queue`. Jedno ve frontě vyvolá vložení REPORT zprávy do fronty na její začátek a druhé vyvolává start vysílání.

Onu_queue

OPNET nabízí několik typů front. Tyto zabudované fronty však nevyhovovaly speciálním požadavkům pro vyvíjený model EPON sítě. Proto byla vytvořena vlastní



Obr. 2.10: Stavový model filteru v ONU.



Obr. 2.11: Stavový model procesoru v ONU.

fronta. Stavový diagram fronty je na obr. 2.12. Fronta může pracovat ve dvou režimech. V režimu FIFO (First In, First Out), kdy jsou příchozí pakety vkládány postupně jen do jedné fronty, ale není dodržena kvalita služeb. Druhý režim pracuje s obsluhou vnitřních front dle schématu WFQ (Weighted Fair Queuing). Tento režim byl vyvinut, aby podporoval základní požadavky pro dodržení kvality služeb. Fronta obsahuje osm sub-front (sub queue). Každá z těchto vnitřních front má definovanou jinou prioritu při obsluze. Fronta 0 má nejvyšší prioritu a přijímá data z VLAN0 až fronta 7 s nejnižší prioritou. Fronty mají přidělené váhy, které určují jaký objem z celého grantu připadne konkrétní frontě. Váhy byly nastaveny dle empirických zkušeností při testování modelu. Váha je vyjádřena koeficientem. Součet koeficientů vah je roven 1. Hodnoty vah pro jednotlivé fronty jsou uvedeny v tab. 2.1. Každá fronta zastupuje jinou třídu provozu.

Init – počáteční stav. Obstarává inicializaci proměnných a atributů. Jsou zde nastaveny váhy jednotlivých front. Stav je vykonán pouze při spuštění simulace, později už nikoliv.

Idle – základní klidový stav. Čeká na vzdáleně vyvolaná přerušení (`START_GATE`, `GEN_REP`), či přerušení (`ARRIVAL`) vyvolané příchodem paketu z některého PtP přijímače.

Tab. 2.1: Váhy a třídy provozu pro jednotlivé fronty.

Fronta/třída	Váha	Typ provozu
fronta 0	0,30	služby v reálném čase – telefonie a videotelefonie
fronta 1	0,28	služby v reálném čase – streamované video
fronta 2	0,11	signalizace
fronta 3	0,09	management sítě
fronta 4	0,07	kritická data
fronta 5	0,06	
fronta 6	0,05	best-effort
fronta 7	0,04	méně důležité služby

Idle_gate – klidový stav v průběhu grantu. Během čekání na odeslání dalšího paketu mohou nastat dvě události. Příchod nového paketu, nebo požadavek na generování dalšího reportu. V takovém případě se ze stavu přechází do *insert_t*, či *gen_rep*, a následně zpět.

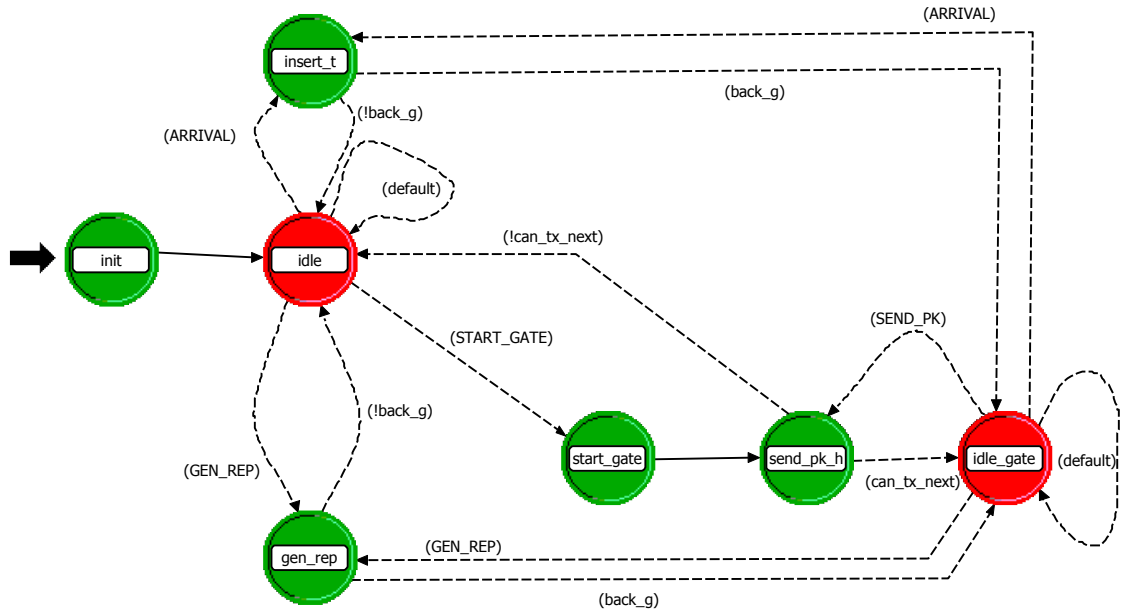
Insert_t – název vyplývá z hlavní vykonávané funkce – vložení přijatého paketu na konec příslušné fronty. Příslušnost se rozlišuje dle čísla packet streamu, který vyvolal přerušení. Do stavu se přechází přerušením ARRIVAL. Stav má dvě návratové hodnoty. Vrací se buď do *idle* (*back_g* != true), nebo do stavu *idle_gate* (*back_g* == true). Návrat se rozhoduje dle toho, z kterého klidového stavu se přešlo do stavu *insert_t*.

Gen_rep – v tomto procesu se generuje nová zpráva REPORT. V paketu se nastaví pole zdrojové adresy (*source_address*) a časová značka (*timestamp*). Ta nese hodnotu aktuálního času simulace [s]. Do polí *gate_length* se vloží hodnota velikosti jednotlivých sub-front [b]. OLT sice tyto hodnoty sčítá a počítá granty logicky pro jednu frontu (intra-ONU scheduling), ale odesílány jsou všechny hodnoty pro pozdější možné využití. Nakonec je zpráva vložena na začátek fronty s nejvyšší prioritou (fronta 0). Ze stavu je možno vrátit se do obou klidových stavů, podle toho ve kterém byl model naposledy. Opět dle hodnoty v proměnné *back_g*.

Start_gate – jak již název napovídá, jedná se o stav vyvolaný přerušením začátku grantu (START_GATE). Stav zjistí velikost aktuálního grantu (*gate_len*) a vypočítá dle vzorce

$$gate_end = op_sim_time() + gate_len \quad (2.4)$$

jeho konec. Pomocí proměnné *gate_end* se v následujícím stavu kontroluje, kolik času zbývá do konce časového slotu. Dále ve stavu probíhá přidělení jednotlivých



Obr. 2.12: Stavový model fronty.

časových úseků v grantu všem aktivním frontám. Toto přidělování probíhá dle

$$subq_grant_i = gate_len \cdot subq_weight_i, \quad (2.5)$$

kde $subq_weight_i$ vyjadřuje váhu pro i -tou frontu. Tyto přidělené úseky platí jen v případě, že by všechny fronty byly aktivní. Pokud je fronta neaktivní, velikost jejího vlastního grantu se přičítá ke zbytku, který je později rozdělen ostatním. Pokud je čas pro odeslání dat z fronty menší než časový slot, který frontě náleží dle priority, je časový slot zmenšen na potřebnou velikost. Zbytek času je přidělen ostatním frontám spravedlivě, opět dle vah. Takto pokud má např. fronta 7 jako jediná v zásobníku data, tak celý grant využije sama. Následuje přechod do stavu $send_pk_h$.

Send_pk_h – na začátku procesu se ověřuje, zda konec grantu není v záporném čase simulace a zda fronta není prázdná. Tyto podmínky musí být splněny. Pokud ne, přechází se do stavu $idle_gate$ (pokud ještě nevypršel čas trvání grantu), nebo $idle$ (v případě konce grantu). Nyní záleží, v jakém fronta pracuje režimu.

Pracuje-li v režimu FIFO, je ze začátku fronty (head) načten paket (zatím se nevyjímá). Zjistí se časová délka paketu (pk_time) a podle této hodnoty se určí, kolik času zabere vyslání daného paketu (nepřímo úměrně závisí na rychlosti fronty). Tuto dobu vyjadřuje vzorec

$$pk_time = \frac{pk_length}{queue_rate}, \quad (2.6)$$

kde *queue_rate* je rychlost fronty a *pk_length* je velikost paketu v bitech. Následuje výpočet zbývající délky grantu (*gate_len_temp*) dle

$$gate_len_temp = gate_end - op_sim_time(). \quad (2.7)$$

Nyní se ověřuje podmínka, zda délka paketu není větší než zbývající čas grantu ($pk_time > gate_len_temp$). Pokud tomu tak není, je paket vyjmut ze začátku fronty, odeslán na *onu_tx* a vyvolává se místní přerušení (SEND_PK) pro další paket ve frontě. Následně se hodnoty proměnných *can_tx_next* a *back_g* nastaví na true. Poté se přechází do stavu *idle_gate*. Celá procedura se opakuje, až do doby dokud není prázdná fronta, nebo není pravdivá jedna z výše uvedených podmínek. Pokud podmínky nejsou splněny, *can_tx_next* a *back_g* se nastaví na hodnotu false a přejde se do stavu *idle*.

V režimu WFQ procedura probíhá obdobně. Jediným rozdílem je využití více front a více grantů (*subq_grant_i*). Jiným způsobem jsou také plánována přerušení. Pokud je doba potřebná pro vyslání paketu dle 2.6, větší než zbývající doba *subq_grant_i* vyvolá se přerušení na začátku dalšího sub-grantu. V předchozím případě to znamenalo konec grantu.

2.3.6 Generátor provozu

Pro generování provozu do sítě za účelem simulací a vyhodnocování funkcí modelu atd. byl vytvořen generátor provozu. Model obsahuje upravený prvek z knihovny OPNETu nazývaný simple source. Tento prvek byl upraven pro potřeby vytvořené sítě. Nastavitelné parametry jsou:

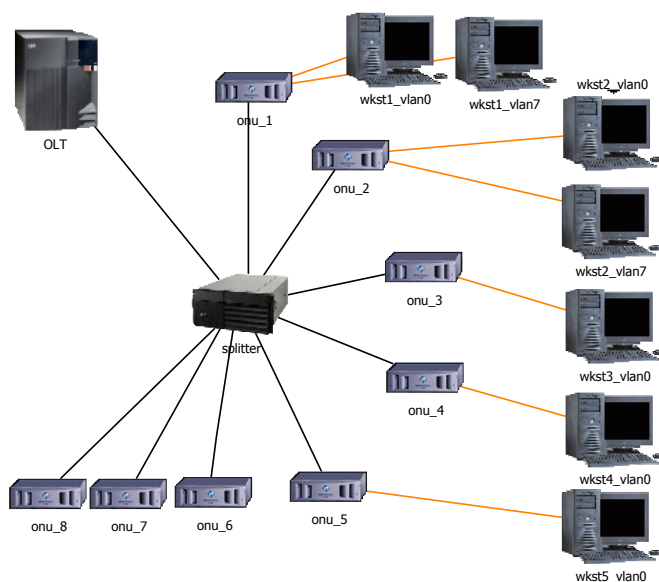
- čas začátku vysílání;
- čas konce vysílání;
- typ generovaného paketu;
- velikost generovaného paketu.

Časy a velikost paketu je možné volit s různým rozložením. Např. normální, exponenciální, atp. Typ generovaného paketu může být kterýkoliv vytvořený v simulačním nástroji. Při simulacích byly nejčastěji využívány rámce Ethernet, ale při vývoji i REPORT.

3 VÝSLEDKY STUDENTSKÉ PRÁCE

3.1 Topologie a parametry sítě

Při simulaci bylo cílem ověřit funkčnost vytvořených síťových prvků. Jejich podrobný popis je v předešlé kapitole. Pro demonstraci výsledků byla sestavena jednoduchá pasivní optická síť. Síť je v simulačním nástroji OPNET vytvořena v logickém kontextu, nezohledňují se tedy vzdálenosti mezi uzly. Jedná se o jednoduchou stromovou topologii. Síť obsahuje jedno optické linkové zakončení OLT, jeden pasivní optický splitter a osm optických koncových jednotek ONU. Základní navržená topologie sítě je na obr. 3.1. Síťové prvky jsou propojeny vytvořenou linkou. Atributy zdrojů dat připojených k ONU jednoktám se v průběhu simulací měnily dle aktuální potřeby. Topologie přístupové sítě ovšem zůstává stále stejná.



Obr. 3.1: Topologie simulované PON sítě.

V tabulce 3.1 jsou uvedeny základní parametry sítě při simulacích. Doba jednoho cyklu byla stanovena na $188 \mu\text{s}$. Tato doba je poměr mezi velikostí cyklu, který zvládne přenášet větší objemy dat, ale zároveň je příznivá ke zpoždění. Rychlost všech linek v síti je 1 Gbps. U optického vlákna je tato rychlost v souladu se standardem pro EPON a u linek v lokálních sítích je tato přenosová rychlost již také běžná. Optické linky nevykazují žádné zpoždění. Chybovost BER je nastavena pro všechna simulovaná optická vlákna na 10^{-10} , což je jedna z typických hodnot. Pro

konkrétní vlákno by musely být parametry zpoždění a BER nastaveny dle protokolu o měření vlákna.

Tab. 3.1: Parametry sítě při simulaci.

Parametr	Hodnota
Počet ONU	8
Přenosová rychlost optické linky	1 Gbps
Přenosová rychlost LAN	1 Gbps
Zpoždění optické linky	0 s
BER optického vlákna	10^{-10}
Počet tříd pro QoS	8
Velikost cyklu	188 μ s
Guard interval mezi granty	1 μ s
Guard interval mezi cykly	7 μ s

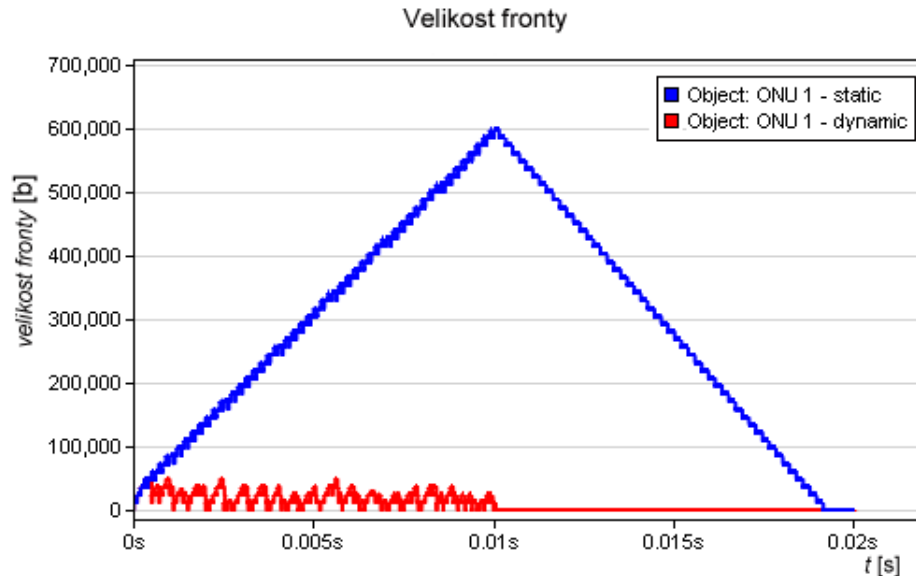
3.2 Výsledky simulací

Simulace jsou rozděleny do několika scénářů. V každém scénáři je simulováno jiné chování sítě, či ověřovány různé vyvinuté funkce.

3.2.1 Scénář 1 – srovnání dynamické a statické alokace

Scénář demonstruje signifikantní rozdíly mezi statickou a dynamickou alokací přenosového pásma ve vzestupném směru komunikace. Topologie sítě je obdobná jako na obr. 3.1 s tím rozdílem, že ke každé aktivní ONU jednotce (*ONU1* – *ONU5*) je připojen pouze jeden zdroj provozu. *ONU6* – *ONU8* zůstávají neaktivní. Doba simulace byla 20 ms. Všechny zdroje dat generovaly stejný provoz v čase simulace 0–10 ms. Generují Ethernet rámce o velikosti 1526 B. Tato velikost je volena v souladu s TCP/IP sítěmi, kde maximální povolená velikost vkládaných dat do Ethernet rámců činí 1500 B. Zbývajících 26 B je velikost záhlaví a hlavičky. Mezera mezi rámci (12 B) není při simulaci uvažována. Rámce jsou generovány s periodou 0,1 ms. Takto vysoký provoz byl nastaven záměrně z důvodu přetížení front pro lepší prezentaci výsledků.

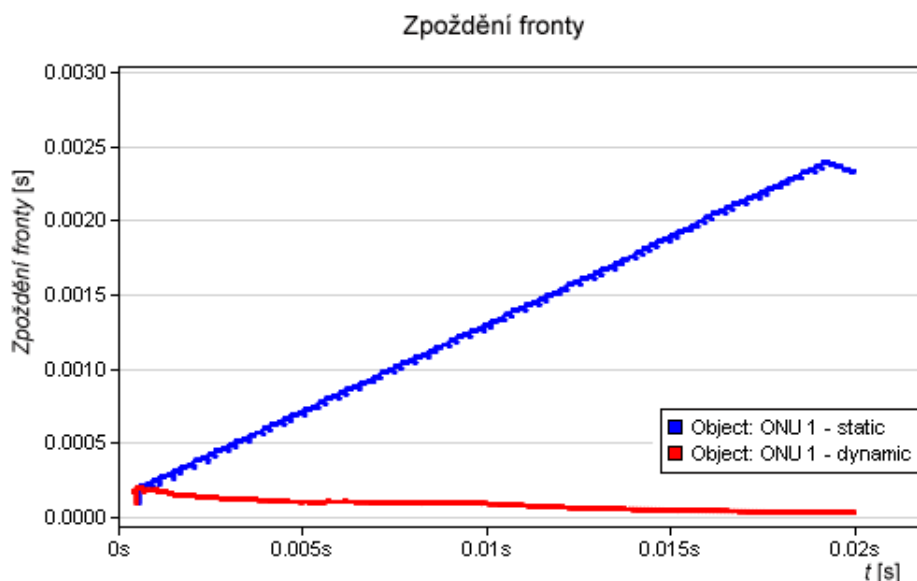
Na obrázku 3.2 lze sledovat rozdíl v plnění fronty v *ONU1* při statické a dynamické alokaci. Při statické alokaci (modrý průběh) se fronta nestíhá vyprazdňovat během alokovaných grantů, které jsou pro všechny ONU stejné. *ONU6* – *ONU8* tak plývají síťovými prostředky, i když nemají data k odeslání. V polovině simulace se



Obr. 3.2: Velikost fronty v *ONU1* při statické a dynamické alokaci.

fronta začne vyprazdňovat, protože již není nadále plněna. Červený průběh vyznačuje zpoždění fronty při dynamické alokaci. Je zde zřejmé, že fronta se v každém grantu vyprázdňuje. Na obr. 3.3 jsou průběhy zprůměrovaného zpoždění dat ve frontě pro *ONU1*. Modrý průběh opět pro statickou alokaci. Zpoždění v tomto případě stále roste, a to i od poloviny simulace, kdy se velikost fronty sice zmenšuje, ale na zpoždění to nemá vliv. Zpoždění při módu dynamické alokace zpočátku mírně stoupá, což je způsobeno inicializačním cyklem, kde jsou všechny granty stejně velké. Postupně klesá, až se ustálí na hodnotě okolo $1 \mu\text{s}$. Průběhy zpoždění neprezentují zpoždění dat přenesených sítí, ale pouze zpoždění dat ve frontě.

Provoz v síti ve vzestupném směru byl zachytáván na pasivním optickém splitteru. Grafy s průběhy provozu pro jednotlivé ONU jsou v příloze B. Na obr. B.1 jsou průběhy při statické alokaci prostředků sítě, graf je výsečí časové osy, která odpovídá cca dvěma cyklům. Lze vidět, že všechny ONU jednotky dostaly přidělené stejné granty, i když nemají data k odeslání. V případě *ONU6* – *ONU8* byly odeslány pouze REPORT zprávy, zbytky grantů zůstávají nevyužity. Přenosová rychlost je 1 Gbps. Každá ONU tedy ve svém přiděleném intervalu využije plnou kapacitu linky. Mezery mezi jednotlivými časovými sloty jsou způsobeny ochrannými intervaly mezi granty a tím, že ve zbytku grantu nemohl být odeslán celý rámec. Proto bylo vysílání z ONU ukončeno. Obr. B.2 zobrazuje průběhy provozu při dynamické alokaci. Vidíme, že neaktivní *ONU6* až *ONU8* dostávají grant dlouhý pouze pro odeslání REPORT zprávy. Neplývají tak síťovými prostředky, jako tomu bylo v předchozím případě. Můžeme zde také pozorovat, že pořadí grantů pro jednotlivé ONU se v cyklu



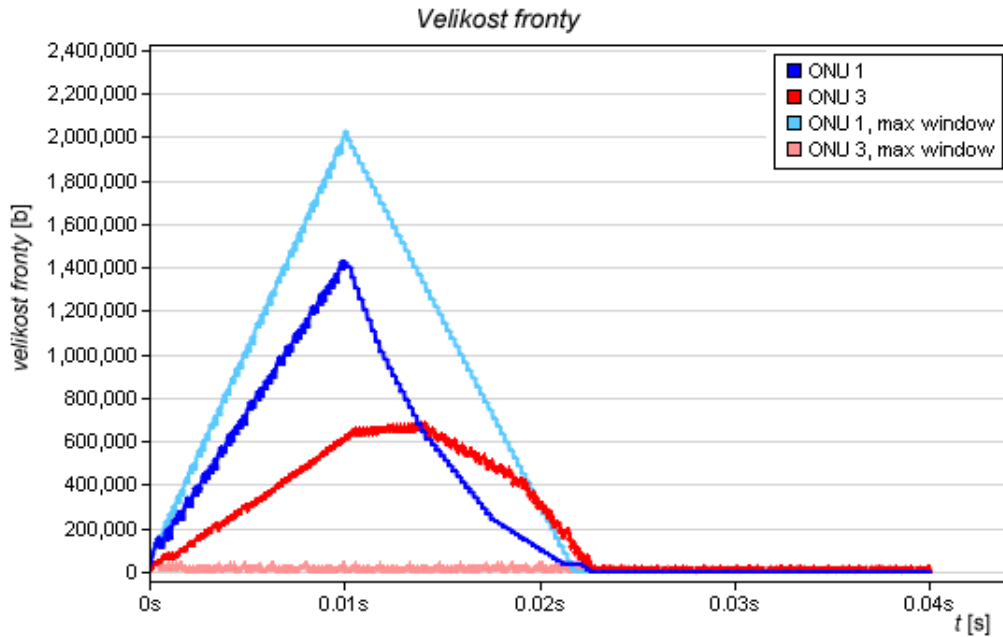
Obr. 3.3: Průměrné zpoždění fronty v *ONU1* při statické a dynamické alokaci.

střídá. To je způsobené samotným algoritmem přidělování šířky pásma. Algoritmus řadí granty do ADT list vždy podle velikosti kvůli pozdějším výpočtům spojenými s funkcí maximálního okna.

3.2.2 Scénář 2 – funkce maximálního okna

V tomto scénáři byl prověřen vliv nastavení ochrany maximálního okna pro alokované granty ve vzestupném směru provozu. Bez této ochrany hrozí, že *ONU* jednotky, které generují významný provoz, zahlcují svými granty většinu přenosové kapacity. Tímto jevem značně omezují ostatní *ONU* jednotky, kterým se nedostává dostatečná příležitost k odvysílání svých dat. Tento jev by neměl nastávat. Topologie sítě opět zůstala zachována jako na obr 3.1. Pro lepší znázornění chování sítě s ochranným oknem a bez něj byly nastaveny následující parametry generátorů provozu. Generátory *wkst1_vlan0* a *wkst1_vlan7* připojené k *ONU1* a *ONU2* generují Ethernet rámce o velikosti 1526 B. *Wkst1_vlan0* je generuje s periodou 0,05 ms a *wkst1_vlan7* s periodou 0,1 ms. Provoz je spuštěn při začátku simulace a trvá 10 ms. Ostatní aktivní *ONU* (*ONU3* – *ONU5*) mají připojeny generátory s parametry: Ethernet rámeček (1526 B), perioda vysílání 0,1 ms, provoz probíhal po celou dobu simulace. *ONU6* – *ONU8* zůstávají neaktivní. Doba simulace byla 40 ms.

Průběhy znázorňující velikost fronty po dobu simulace jsou na obr. 3.4. Průběhy jsou pro režim s ochranou maximálním oknem i bez ní. Modrá a červená křivka znázorňují plnění front bez max. okna. Lze zde pozorovat plnění fronty u *ONU1*, které se však vzhledem k příchozímu provozu dá očekávat. Naproti tomu naplnění

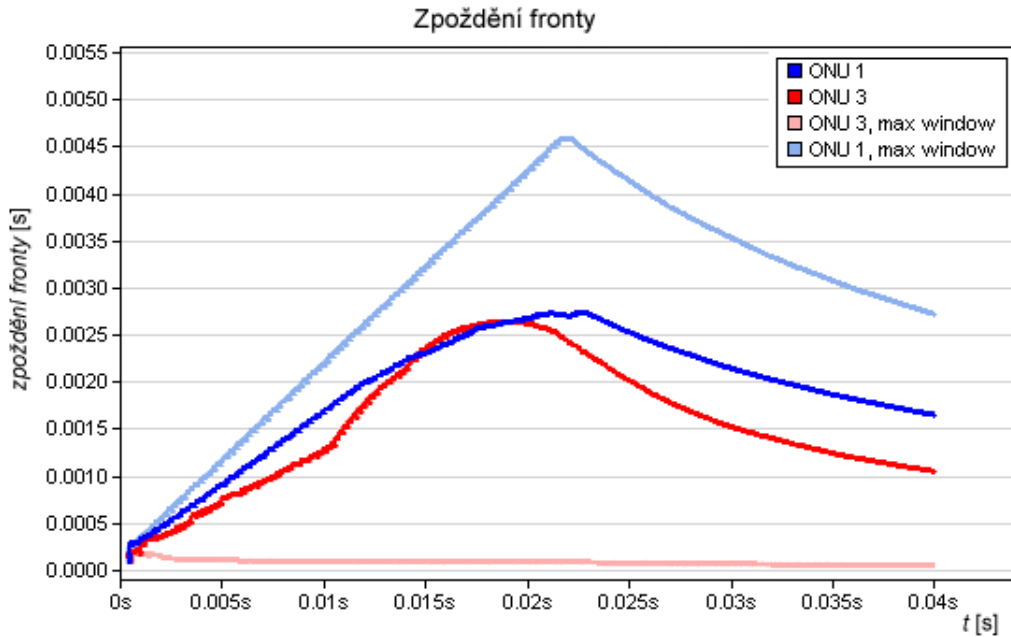


Obr. 3.4: Velikost fronty v *ONU1* pro 2. scénář.

fronty u *ONU3* při jejím malém provozu je velmi znepokojivé. V praxi by při přenosu dat citlivých na zpoždění mohlo docházet ke zhoršení kvality přenosu. Zpoždění dosahuje necelých 3 ms. Je však potřeba brát v úvahu, že to je zpoždění zásobníku v *ONU*, nikoliv zpoždění přenosu přes celou síť. Toto zpoždění tedy bude ještě vyšší. V čase 1 ms se fronty začnou postupně vyprazdňovat. Vyprazdňování *ONU3* probíhá s menší strmostí, což je způsobeno tím, že jednotka stále přijímá data. Poté od času cca 2,3 ms už je aktivní pouze *ONU3*. Velikost fronty v *ONU3* při režimu ochrany max. oknem mírně vzrostla, ale *ONU3* využívá větší kapacitu přenosového pásma a tak frontu vyprazdňuje během každého grantu.

Zpoždění front pro oba módy lze pozorovat na obr. 3.5. V prvním případě, kdy není zapnuta ochrana, jsou zpoždění téměř totožná. U *ONU3*, je však toto zpoždění silně nežádoucí, protože generuje normální provoz, na rozdíl od *ONU1*, která přetěžuje síť. Po zapnutí ochrany sice vzroste zpoždění *ONU1*, ale *ONU3* má minimální zpoždění při odbavování svých dat.

Model OLT podporuje několik velikostí maximálního okna, konkrétně 40 %, 30 % a 20 %. Tento údaj značí kolik procent z celkové délky cyklu smí maximálně alokovat jedna *ONU* jednotka. Hodnota 40 % se hodí do sítí, kde se nepředpokládá, že by jedna koncová stanice extrémně zatěžovala síť. Hodí se pro náhodné zvýšení přenosu od jedné stanice, které není příliš časté. 20% velikost okna je vhodná do sítí, kde se předpokládá zvýšený provoz od koncových jednotek. Tento parametr je nutné nastavit, aby nebyly zvýhodněny ostatní jednotky. V sítích, kde by bylo připojených



Obr. 3.5: Průměrné zpoždění fronty v *ONU1* pro 2. scénář.

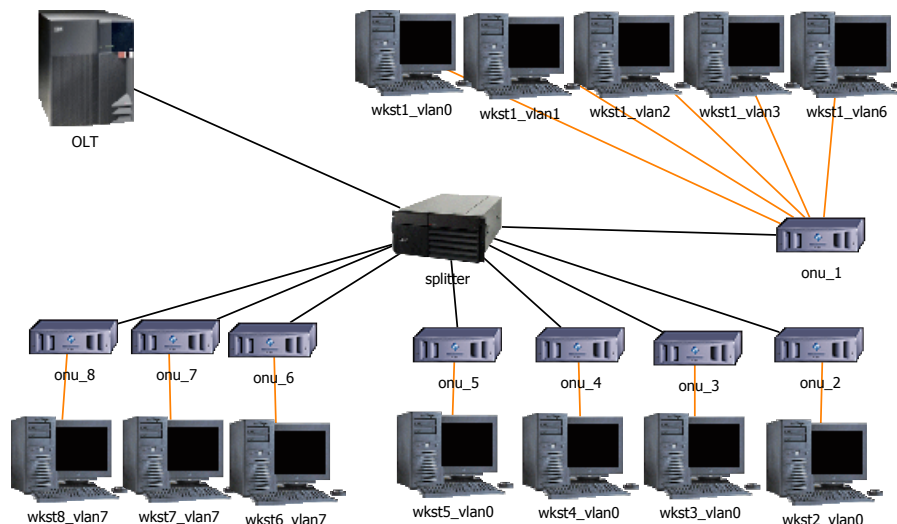
až 32 ONU jednotek, by bylo potřeba nastavit velikost max. okna ještě menší.

3.2.3 Scénář 3 – podpora QoS

Cílem třetího scénáře bylo ověřit navrženou podporu QoS na úrovni ONU jednotek, zejména pak vyprazdňování front dle WFQ schématu. Topologie sítě byla přepracována a je znázorněna na obr. 3.6. Sít se navrženou topologií snaží simulovat využití PON v sítích typu FTTB, které často poskytují tzv. triple play služby. Je zde kladen důraz na kombinaci vysoké šířky pásma a zároveň nízkého zpoždění. Zákazník má v jednom balíčku vysokorychlostní internet, televizi a telefon, vše dostupné skrze jednu přístupovou síť. ONU jednotka při této topologii zastupuje skupinu zákazníků, např. jeden menší bytový dům.

V síti je připojených osm ONU jednotek. *ONU1* slouží pro demonstraci funkčnosti QoS. Ostatní ONU pouze generují provoz na pozadí. Parametry přístupové sítě zůstávají stejné jako v úvodu kapitoly. OLT pracuje v režimu dynamické alokace síťových prostředků ve vzestupném směru a s nastaveným maximálním oknem na 20 %. Délka simulace byla 40 ms. Nastavení parametrů jednotlivých koncových stanic je následující:

- *ONU1* – Tato jednotka pracuje s pěti třídami provozu. Třídy provozu jsou rozlišeny připojením generátorů provozu do jednotlivých VLAN, každá VLAN náleží jedné frontě, která vyjadřuje danou třídu, viz popis ONU v podkapitole

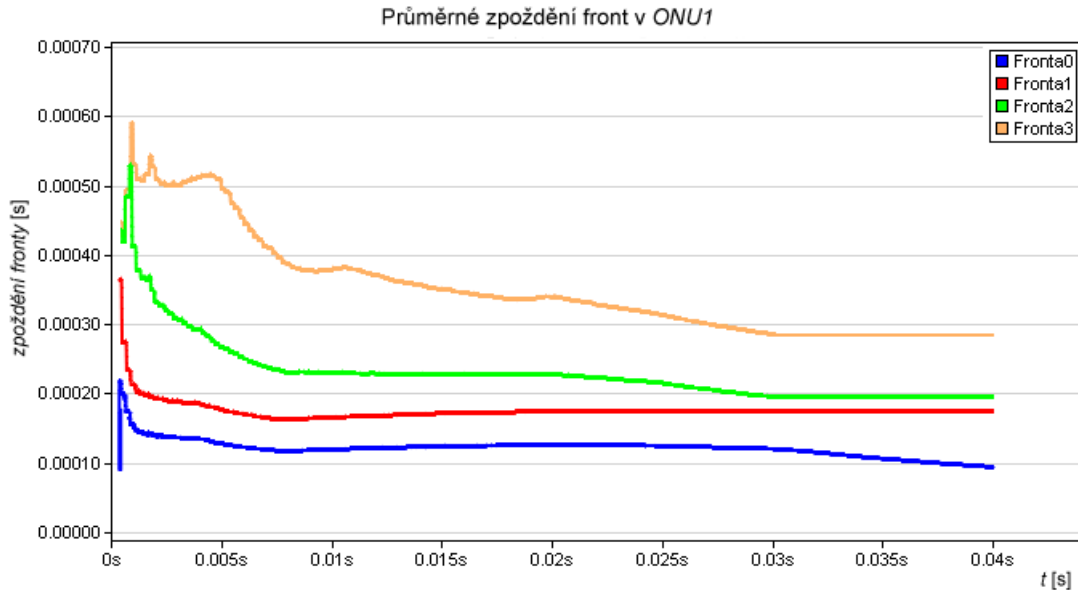


Obr. 3.6: Topologie sítě pro scénář 3.

2.3.5. Pro ověření funkčnosti modelu nemohly být jednotlivým třídám definovány pro ně typické objemy přenášených dat. Šířka pásma přístupové sítě je při 8 připojených ONU příliš vysoká a nízké provozní např. pro služby s důrazem na zpoždění dat nemají dost vysoké přenosové rychlosti, aby se simulované vlastnosti dostatečně projevíly. Generátory pro všechny třídy generují stejný provoz. Jsou připojeny do tříd 0, 1, 2, 3 a 6. Třída 0 s nejvyšší prioritou až třída 6 s nejnižší. ONU definuje celkem 7 tříd, jejichž váhy jsou uvedeny v tab. 2.1. Rámce jsou generovány opět typu Ethernet o velikosti 500 B s periodou 40 μ s. *Wkst1_vlan0* a *wkst1_vlan1* generují provoz od začátku simulace do 20 ms. Generátory *wkst1_vlan2* a *wkst1_vlan3* jsou spuštěny v čase 0 až 30 ms. *Wkst1_vlan6* pracuje po celou dobu simulace.

- *ONU2* až *ONU5* – slouží pouze ke generování provozu na pozadí. Jednotky jsou aktivní kvůli dodržení reálného chování sítě, kdy komunikuje vždy více koncových stanic a síť tak není vytížená pouze jednou ONU. Generátory *wkst_i_vlan0* vysílají data s přenosovou rychlostí 30,52 Mbps. Velikost Ethernet rámců je nastavena na 1526 B (1500 B MTU plus režijní data) a jsou vysílány s periodou 0,4 ms. Velikost rámců odpovídá velikosti rámců při datových přenosech.
- *ONU6* až *ONU8* – Simulují přenos dat s nižší přenosovou rychlostí. *Wkst_i_vlan0* připojené k těmto ONU generují rámce o velikosti 300 B s periodou 1 ms. To odpovídá přenosové rychlosti 2,4 Mbps.

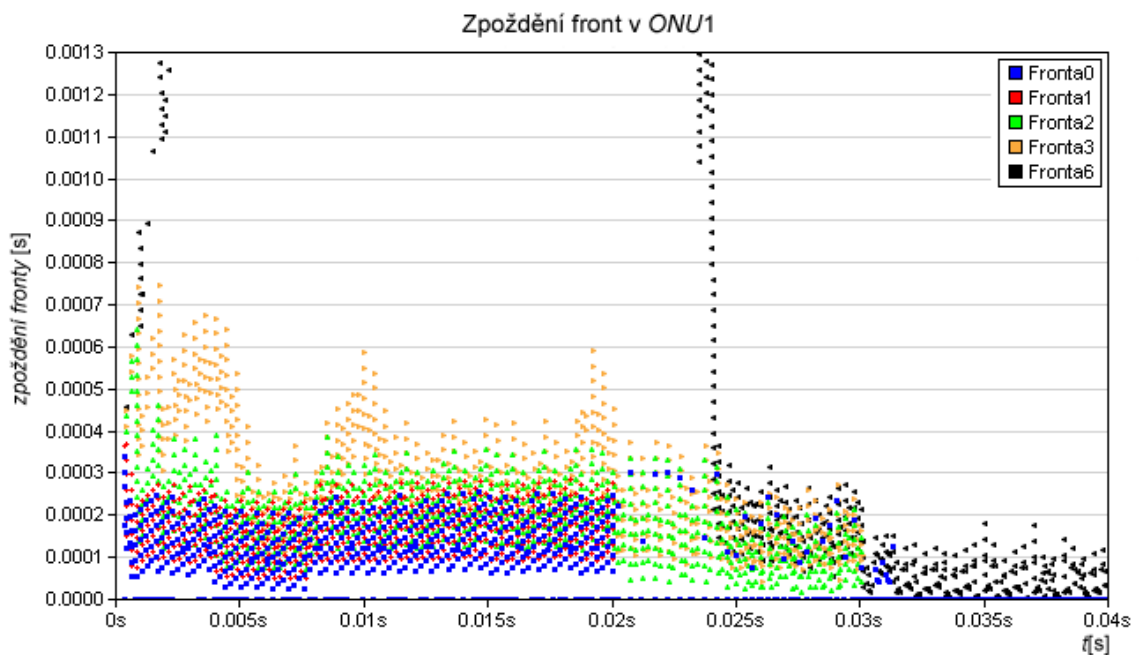
Průměrné zpoždění front 0–3 v *ONU1* je na obr 3.7. Lze vidět, že fronty s nej-



Obr. 3.7: Závislost průměrného zpoždění front v *ONU1* na čase.

vyšší třídou priority si udržují konstantní průměrné zpoždění. Zpoždění ve frontách s nižšími třídami priority je již vyšší a i kolísá. Hodnoty zpoždění na začátku simulace jsou vyšší opět z důvodu inicializačního cyklu. Průběhy zpoždění ze všech aktivních front v *ONU1* jsou v příloze na obr. B.3. Zpoždění ve frontě 6 od začátku simulace narůstá, což je způsobeno příliš malými přidělenými granty a fronta se tak nestačí vyprazdňovat.

Nespojité průběhy zpoždění front (absolutní hodnota zpoždění) v *ONU1* jsou vyobrazeny na obr. 3.8. Graf je pro lepší čitelnost výsledků na ose *y* přiblížen na interval 0–1,3 ms. Z tohoto důvodu není viditelný celý průběh zpoždění fronty 6, ten je v celém rozsahu k vidění v příloze B na obr. B.4. V první fázi simulace (čas 0–20 ms) jsou v provozu fronty s pěti třídami priority. Fronta 0 a fronta 1, které mají nejvyšší prioritu vykazují nejnižší zpoždění a malé kolísání zpoždění (jitter). Fronta 2 má již o něco málo vyšší zpoždění a začíná se projevovat i jitter. Fronta 3 má dvojnásobné zpoždění oproti frontám s nejvyšší prioritou a projevuje se i kolísání. Právě kolísání zpoždění je nevhodné pro přenosy dat v reálném čase, konstantní zpoždění není tolik kritické. Zpoždění ve frontě 6 v první fázi prudce narůstá, protože při obsazenosti ostatních front nedostává v grantu příliš prostoru pro odeslání dat. Ve druhé fázi (2–3 ms) jsou v provozu již pouze fronty 2, 3 a 6. Lze pozorovat, že zpoždění fronty 6 prudce klesá, protože již dostává větší časové sloty v grantu pro odeslání svých dat. Stejně tak zpoždění front 2 a 3 se snížilo. U fronty 3 kleslo i kolísání. V poslední části simulace je v provozu pouze fronta 6, která má nyní k dispozici celý grant. Zpoždění klesá na minimum.



Obr. 3.8: Absolutní zpoždění front v *ONU1*.

Průběhy zpoždění front v *ONU2*, *ONU3*, *ONU4* a *ONU5* jsou znázorněny v příloze na obr. B.5. Zpoždění v první fázi simulace je téměř dvojnásobné, což je způsobeno vytížením sítě *ONU1*, hodnoty zpoždění však nejsou nijak kritické. V následujících fázích simulace se zpoždění snižuje. Stejně tak kolísání zpoždění není závažné.

Scénář ukazuje, že navržený model plně podporuje jednotlivé třídy provozu. Při intra-ONU plánování jsou v ONU tyto třídy upřednostňovány dle zadaných vah. Fronty, patřící do nejvyšších tříd svá data odbavují s minimálním zpožděním, což je vhodné zejména pro služby pracující v reálném čase. Zpoždění nenarůstá také proto, že datové rámce u těchto služeb nedosahují vysoké velikosti a pro odbavení jim stačí menší časový interval. Naopak fronty, které reprezentují třídy s nižší prioritou podléhají vyššímu zpoždění, protože nedostávají vyhrazené dostatečně dlouhé časové úseky v grantu. Navíc data při čistě datových přenosech jsou často přenášena v rámcích s maximální možnou velikostí (MTU). Tím pádem se v krátkých časových úsecích nestihnou ve směru od účastníka odeslat.

4 ZÁVĚR

Nároky na datový přenos jsou stále vyšší, a to jak v korporátní, tak i v soukromé sféře. Proto je třeba neustále obnovovat infrastrukturu nejen přístupových sítí. Avšak přístupové sítě jsou nejpomalejší částí celé sítě. Proto se jako vhodné řešení nabízí využít jako přenosové médium optické vlákno, které má z fyzikálního hlediska nejvyšší dosažitelnou přenosovou rychlost. Takové sítě nazýváme optické přístupové sítě. Ty mohou být buď aktivní, nebo pasivní, jimiž se zabývá tato diplomová práce. Pasivní optické sítě podporují dva standardy. GPON, který využívá k přenosu informací mezi optickým linkovým zakončením OLT a koncovou optickou jednotkou ONU modifikované ATM rámce. Dále pak EPON, který přenáší standardní Ethernet rámce s pozměněným záhlavím v hlavičce. Druhý zmíněný se prozatím jeví jako perspektivnější řešení, protože již nyní má svého nástupce s přenosovou rychlostí 10 Gbps. Tento standard byl navržen v roce 2009 a je nazýván 10GEPON. Proto byl standard EPON zvolen i pro návrh modelu optické sítě a následné simulace.

V teoretické části se práce zabývá rozbořem optických sítí, jejich rozdělením a základními druhy pro stavbu a návrh optických sítí. V další části jsou podrobně popsány standardy EPON a 10GEPON. Je zde rozebrán protokol MPCP pro řízení celé komunikace v síti. Dále je diskutována bezpečnost v PON sítích. Jsou zde prezentovány možné útoky a efektivní obrana.

Praktická část práce měla za cíl navrhnout a simulovat pasivní optickou síť v simulačním nástroji OPNET Modeler. Pro návrh modelu byl zvolen standard EPON. V OPNET Modeler byly vytvořeny základní síťové entity. OLT pracuje v módu statického a dynamického alokování šířky přenosového pásma ve směru vzestupném. Pro dynamickou alokaci byl vyvinut a implementován algoritmus maximálního okna, který hlídá maximální velikost přiděleného grantu jedné koncové jednotce. Velikost maximálního okna definuje poměr velikosti grantu ku celkové velikosti cyklu. Tato funkce odstraňuje možnost monopolizace sítě jednou ONU jednotkou, která žádá o příliš vysoké síťové prostředky. Do koncových ONU jednotek byla implementována podpora kvality služeb. Je zde definováno osm front. Každá fronta pracuje v jiné třídě. Fronty jsou obsluhovány spravedlivě dle přidělených vah. K tomu byl implementován algoritmus WFQ.

Výsledky simulací jsou uvedeny v předchozí kapitole, kde jsou i náležitě komentovány. Při simulaci byly provedeny celkem tři scénáře. V prvním scénáři byly porovnány metody statické a dynamické alokace grantů ve vzestupném směru komunikace. Při statické alokaci se fronta nestihne během jednoho grantu vyprázdnit. Grant je natolik krátký, že se přenesou jen jeden datový rámec. Pokud jsou granty alokovány dynamicky, fronta se v každém cyklu vyprázdní. Důležitou vlastností dynamické alokace je, že není plýtváno síťovými prostředky. Model podporuje funkci zkracování

délky cyklu. V případě, že je součet grantů menší než celková délka cyklu, je cyklus zkrácen na součet délek grantů. Toto je vhodné zejména v případech, kdy není síť vytěžována daty, např. v noci. Dynamická alokace má také kladný dopad na zpoždění front. Další nepostradatelnou funkcí dynamické alokace je ochrana maximální velikosti grantu – tzv. maximální okno. Funkce maximálního okna zabezpečuje, aby ONU, která potřebuje odeslat vysoký počet zpráv, nezabírala svým grantem značnou část z cyklu. Vliv této funkce na fungování sítě je simulován ve druhém scénáři. Výsledky simulace ukázaly funkčnost navrženého algoritmu. Maximální okno bylo v tomto případě nastaveno na 20 %. Simulace v posledním scénáři předvádí podporu QoS na úrovni ONU jednotek. Plánování provádí OLT a do každé ONU zašle jednu GATE zprávu. Na základě velikosti grantu poté ONU jednotka rozhodne, jaký časový úsek přidělí jednotlivým frontám. Fronty jsou obsluhovány dle přidělených tříd priority. Nejvyšší třídy si udržují konstantní zpoždění, které nedosahuje vysokých hodnot. U nižších tříd zpoždění narůstá a začíná i kolísat, což nevádí u datových přenosů, ale je nevhodné při přenosech dat v reálném čase. Tento scénář simuloval síť typu FTTB, kde jedna ONU obsluhuje několik koncových stanic. Podpora QoS se ukázala jako nevyhnutelné řešení.

LITERATURA

- [1] CHEN, X., SHOU, G., GUO, Z., HU, Y. Encryption and Authentication Mechanism of 10G EPON Systems Based on GCM. *e-Business and Information System Security (EBISS), 2010 2nd International Conference on* [online]. 22 – 23. 05. 2010. [cit. 05. 05. 2012]. Dostupné z WWW: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5473490&isnumber=5473261>>.
- [2] FILKA, M. Optoelektronika pro telekomunikace a informatiku. Brno: Centa, 2009. ISBN 9788086785141.
- [3] HAJDUCZENIA, M., INACIO, P. R. M., DA SILVA, H. J. A. , FREIRE, M. M., MONTEIRO, P. P. On EPON security issues. *IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 9, no.1* [online]. první kvartál 2007, s. 68 – 83. [cit. 05. 05. 2012]. Dostupné z WWW: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4198187&isnumber=4198182>>.
- [4] IEEE: IEEE Std 802.3ah-2004, Amendment: Media Access Control Parameters, Physical Layers, and Management Parameters for Subscriber Access Networks. [online]. [cit. 28. 11. 2011]. LAN/MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society. Dostupné z WWW: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1337489>.
- [5] KRAMMER, G., Banerjee, A., Singhal, N.K., Mukherjee, B., Sudhir D. a Yinghua Y. Fair queueing with service envelopes (FQSE): a cousin-fair hierarchical scheduler for subscriber access networks. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol.22, no.8, s. 1497–1513 [online]. 2004 Dostupné z WWW: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1339408&isnumber=29532>>.
- [6] KRAMMER, G., MUKHERJEE, B. a MAISLOS, A. Ethernet Passive Optical Network (EPON). [online]. [cit. 28. 11. 2011]. Dostupné z WWW: <http://networks.cs.ucdavis.edu/~mukherje/links/gk_wiley_bc.pdf>.
- [7] LAFATA, P. Pasivní optická přístupová síť EPON. *Access server* [online]. 23. 05. 2009, roč. 7, č. 2009050003, [cit. 28. 11. 2011]. ISSN 1214-9675. Dostupné z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?navezclanku=pasivni-opticka-pristupova-sit-epon&cisloclanku=2009050003>>.

- [8] LAFATA, P. a VODRÁŽKA, J. Pasivní optická síť GPON. *Access server* [online]. 23. 05. 2009, roč. 7, č. 2009050002, [cit. 28. 11. 2011]. ISSN 1214-9675. Dostupné z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2009050002>>.
- [9] LAFATA, P. a VODRÁŽKA, J. Rozvoj přípojek FTTx. *Elektrorevue* [online]. 31. 03. 2010, č. 2010/23, [cit. 28. 11. 2011]. ISSN 1213-1539. Dostupné z WWW: <<http://elektrorevue.cz/cz/clanky/komunikacni-technologie/40/rozvoj-pripojek-fttx/>>.
- [10] LAFATA, P. a VODRÁŽKA, J. Pasivní optická síť 10GEPON. *Elektrorevue* [online]. 31. 08. 2010, č. 2010/49, [cit. 28. 11. 2011]. ISSN 1213-1539. Dostupné z WWW: <<http://elektrorevue.cz/cz/clanky/komunikacni-technologie/30/pasivni-opticka-sit-10gepon/>>.
- [11] OPNET TECHNOLOGIES, *OPNET Modeler Documentation Set*. 20. 11. 2009, ver. 16. Součást instalace programu OPNET Modeler.
- [12] PENG, Z. a RADCLIFE PJ. Modeling and Simulation of Ethernet Passive Optical Network (EPON) Experiment Platform based on OPNET Modeler. *IEEE Explore* [online]. [cit. 28. 11. 2011]. Communication Software and Networks (ICCSN), 2011 IEEE 3rd International Conference on. Dostupné z WWW: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6013671>>.
- [13] SCHLITTER, P. Optické přístupové sítě. *Access server* [online]. 28. 07. 2004, roč. 2, č. 2004072807, [cit. 28. 11. 2011]. ISSN 1214-9675. Dostupné z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2004072807>>.
- [14] VODRÁŽKA, J. Základy FTTx. *Access server* [online]. 22. 05. 2006, roč. 4, č. 2006051702, [cit. 28. 11. 2011]. ISSN 1214-9675. Dostupné z WWW: <<http://access.feld.cvut.cz/view.php?nazevclanku=zaklady-fttx&cisloclanku=2006051702>>.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

10GEPON	10 Gbps Ethernet Passive Optical Network
ADT	Abstract Data Type
AES	Advanced Encryption Standard
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BER	Bit Error Rate
CO	Central Office
CRC8	8 b Cyclic Redundancy Check
DOCSIS	Data Over Cable Service Interface Specification
DoS	Denial of Service
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer
EPON	Ethernet Passive Optical Network
FBT	Fused Biconic Taper
FCS	Frame Check Sequence
FEC	Forward Error Correction
FIFO	First In, First Out
FTTB	Fiber to the Building
FTTC	Fiber to the Curb
FTTCab	Fiber to the Cabinet
FTTH	Fiber to the Home
FTTN	Fiber to the Node
FTTB	Fiber to the Office
FTTx	Fiber to the x
GPON	Gigabit Passive Optical Network
IPTV	Internet Protocol television

λ_1	Vlnová délka 1
λ_2	Vlnová délka 2
LAN	Local Area Network
LLID	Logical Link Id
MAC	Media Access Control
MPCP	Multi-point Control Protocol
MTU	Maximum Transmission Unit
ODN	Optical Distribution Network
OLT	Optical Link Termination
ONT	Optical Network Termination
ONU	Optical Network Unit
PLC	Planar Lightwave Circuit
POF	Plastic Optical Fiber
PON	Passive Optical Network
PtMP	Point to Multi Point
PtP	Point to Point
QoS	Quality of Service
RADIUS	Remote Authentication Dial In User Service
<i>RTT</i>	Round Trip Time
SDD	Space Division Duplex
SFD	Start of Frame Delimiter
SLD	Start of LLID delimiter
SME	Shared-Medium Emulation
TDM	Time Division Multiplex
TDMA	Time Division Multiple Access

ToS	Theft of Service
VDSL	Very High Speed DSL
VLAN	Virtual Local Area Network
VOD	Video on Demand
VoIP	Voice over Internet Protocol
VPN	Virtual Private Network
WDD	Wave Division Duplex
WDM	Wave Division Multiplex
WFQ	Weighted Fair Queuing
xDSL	Digital Subscriber Line

SEZNAM PŘÍLOH

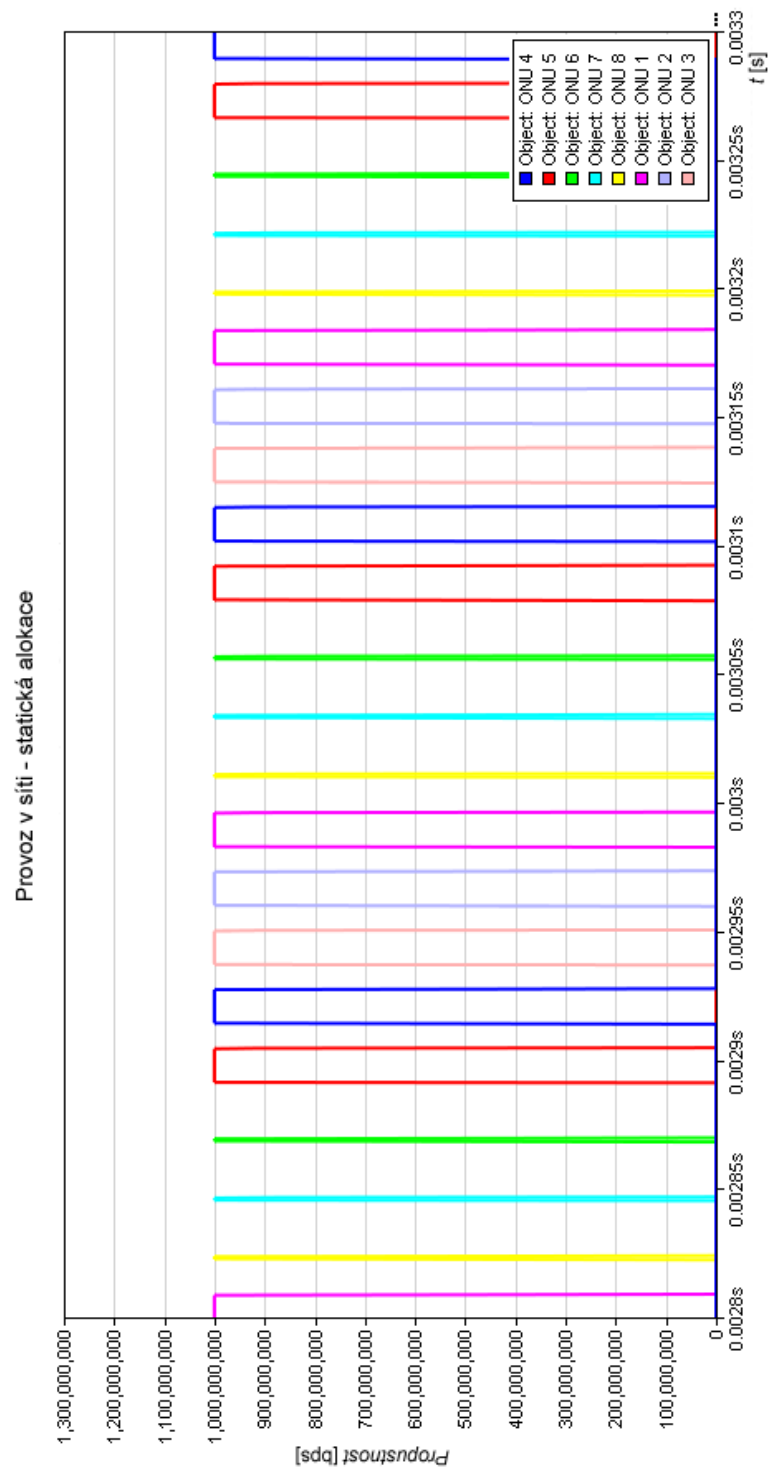
A Porovnání standardů EPON a 10GE PON	60
B Přiložené grafy	61
C Obsah přiloženého DVD	66

A POROVNÁNÍ STANDARDŮ EPON A 10GE-PON

Tab. A.1: Srovnání vlastností standardů EPON a 10GE-PON [10].

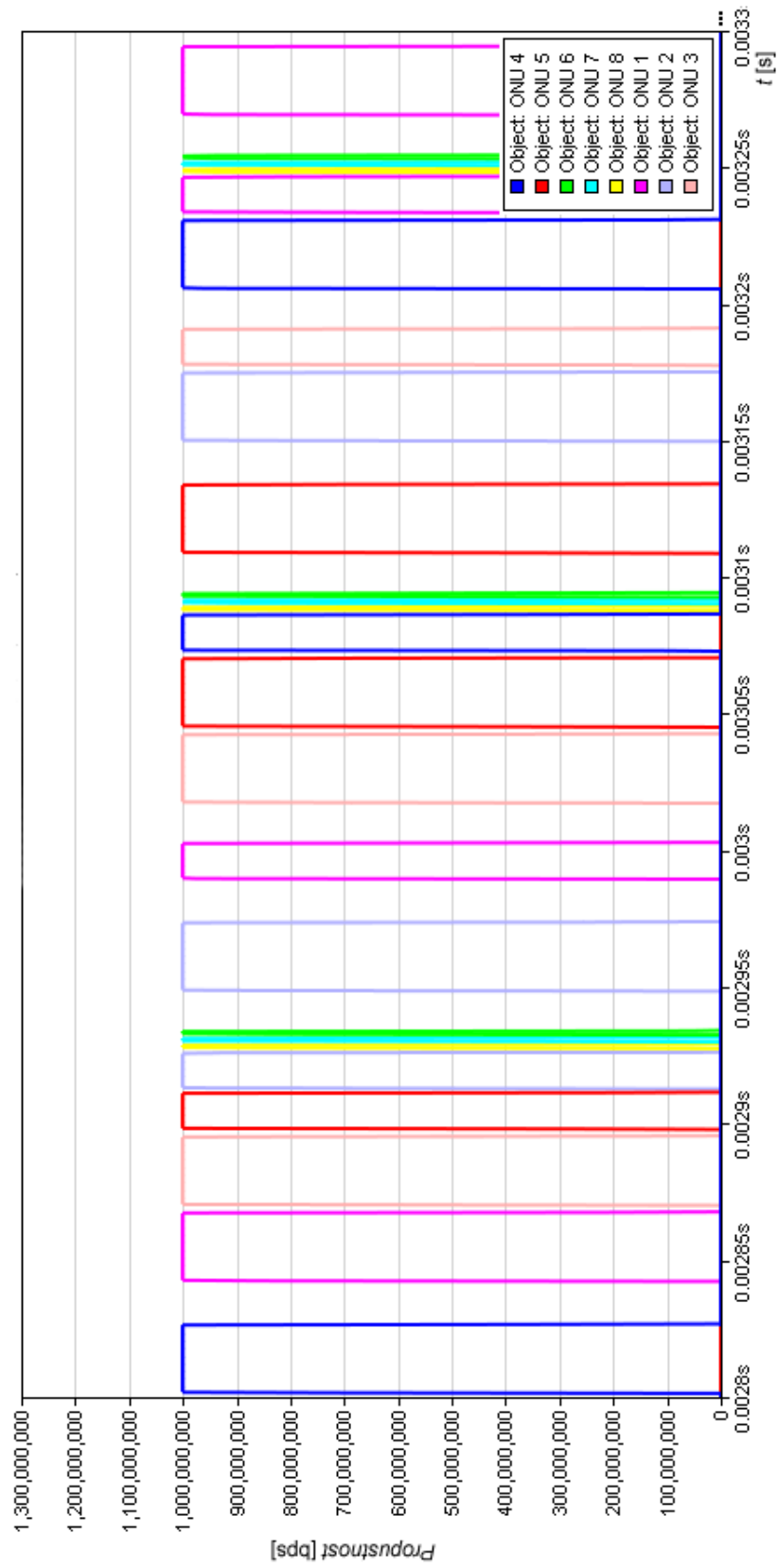
	10GE-PON	EPON
standart	IEEE 802.3av (2009)	IEEE 802.3av (2004)
přenosová rychlost	10/10 Gbps symetricky	1/1 Gbps symetricky
	10/1 Gbps asymetricky	
přenosová rychlost na fyzické vrstvě	10,3125 Gbps	1,25 Gbps
	1,25 Gbps	
překódování	64 b/66 b (3%)	8 b/10 b (20%)
útlumové třídy	PR10, PRX10	PR10
	PR20, PRX30	PX20
	PR30, PRX30	
vlnové délky [nm]	sestupný směr 1575–1580	sestupný směr 1480–1500
	vzestupný směr 1260–1280 nebo 1260–1360	vzestupný směr 1260–1360
dosah [km]	$\leq 10, \leq 20$	$\leq 10, \leq 20$
maximální rozbočovací poměr	1:16, 1:32	1:16, 1:32
zabezpečení FEC	povinné RS (255, 223)	volitelné RS (255, 239)

B PŘILOŽENÉ GRAFY

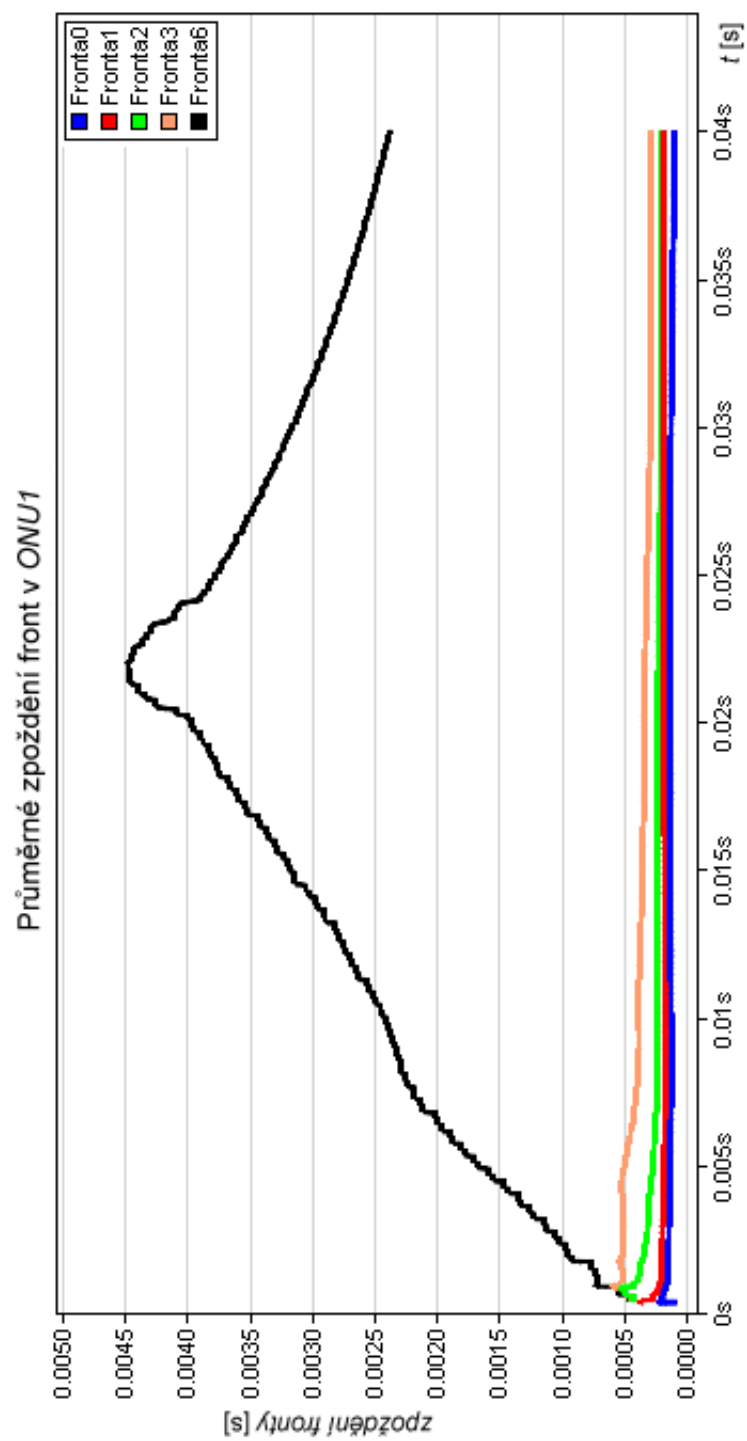


Obr. B.1: Scénář 1 – provoz v síti, statická alokace.

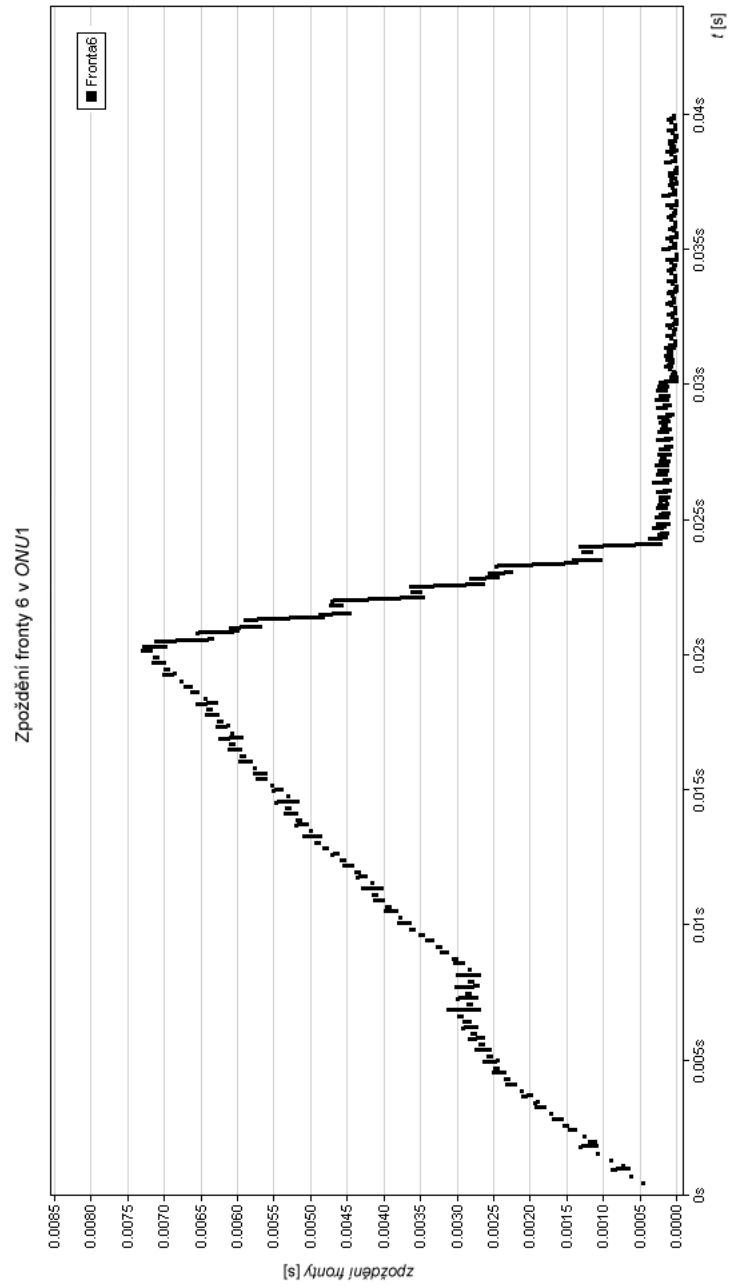
Provoz v síti - dynamická alokace



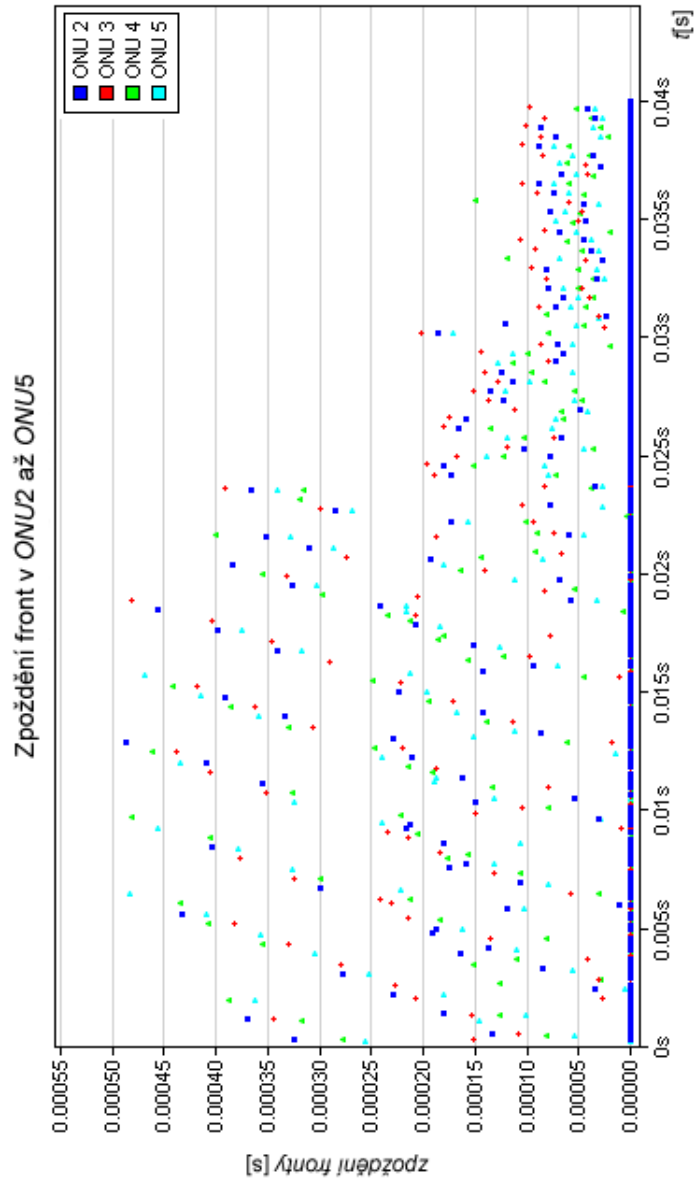
Obr. B.2: Scénář 1 – provoz v síti, statická alokace.



Obr. B.3: Scénář 3 – Průměrné zpoždění všech aktivních front v ONU1.



Obr. B.4: Scénář 3 – závislost absolutního zpoždění fronty 6 v ONU1 .



Obr. B.5: Scénář 3 – Závislost absolutního zpoždění front v *ONU2* až *ONU5*.

C OBSAH PŘILOŽENÉHO DVD

Přiložené DVD médium obsahuje následující adresářovou strukturu:

`\Prakticka_cast` – Tento adresář obsahuje zdrojové soubory programu OPNET Modeler rozdělené do adresářů dle jejich druhu.

`\Prakticka_cast\ICIformat` – ICI (Interface Control Information formats) je kolekce dat využívaných k přenosu informací mezi přerušeními. V modelu je ICI využíváno v ONU jednotce.

`\Prakticka_cast\Links` – adresář obsahuje soubor vytvořeného modelu linky.

`\Prakticka_cast\Nodes` – zde jsou uloženy modely všech vytvořených uzlů sítě.

`\Prakticka_cast\Packets` – struktura GATE a REPORT zpráv pro OPNET Modeler.

`\Prakticka_cast\Processes` – modely všech jednotlivých procesů.

`\Prakticka_cast\Project_archive` – V adresáři je uložen archiv projektu ve formátu .opcfa. Archiv je možno extrahovat v programu OPNET Modeler v nabídce *File > Manage Model Files > Expand Project Archive*.

`\Text_prace` – obsahuje PDF soubor `diplomova_prace.pdf` s elektronickým textem této práce.