

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ

Бојан Р. Пајчин

ЕНЕРГЕТСКИ ЕФИКАСНЕ ЕТЕРНЕТ  
ПАСИВНЕ ОПТИЧКЕ МРЕЖЕ БАЗИРАНЕ НА  
МУЛТИПЛЕКСИРАЊУ ПО ТАЛАСНИМ  
ДУЖИНАМА

докторска дисертација

Београд, 2021

UNIVERSITY OF BELGRADE  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Bojan R. Pajčin

**ENERGY-EFFICIENT ETHERNET PASSIVE  
OPTICAL NETWORKS BASED ON  
WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2021

Ментор:

Др Петар Матавуљ, редовни професор  
Електротехнички факултет, Универзитет у Београду

Чланови комисије:

Др Петар Матавуљ, редовни професор  
Електротехнички факултет, Универзитет у Београду

Др Предраг Иваниш, редовни професор  
Електротехнички факултет, Универзитет у Београду

Др Мирјана Радивојевић, редовни професор  
Рачунарски факултет, Универзитет Унион

Искрено се захваљујем ментору проф. др Петру Матавуљу на огромној подршци, помоћи, стручном усмеравању, великом стрпљењу и драгоценим саветима током свих година докторских студија, научно-истраживачког рада и израде докторске дисертације.

Такође се захваљујем и проф. др Мирјани Радивојевић на великој помоћи, дељењу знања и саветима током научно-истраживачког рада.

Посебно се захваљујем и проф. др Предрагу Иванишу на несебичној помоћи и искреним саветима који су ми помогли током мог академског рада.

Колеги Мирославу Илићу дугујем огромну захвалност на свакодневним стручним дискусијама, помоћи и саветима који су у великој мери обликовали моје стручне способности и помоћу којих сам током година студирања и рада успео да решим доста мањих и већих стручних изазова.

Неизмерну захвалност желим да искажем и Институту ИРИТЕЛ а.д. који ми је омогућио учествовање у пројектима и услове за научно-истраживачки рад и подржавао ме током докторских студија опремом, лабораторијама, добром вољом и стрпљењем.

Рад посвећујем мојој породици.

**Наслов тезе:** Енергетски ефикасне етернет пасивне оптичке мреже базирани на мултиплексирању по таласним дужинама

**Сажетак:** Због све веће потрошње електричне енергије у свету уштеда енергије у етернет пасивним оптичким мрежама – EPON (енгл. *Ethernet Passive Optical Networks*) постаје важан фактор у развоју оптичких приступних мрежа. Последњих година предложене су разне технике за уштеду енергије, међу којима је увођење терминалних ONU (енгл. *Optical Network Unit*) јединица у режим спавања препознато као врло перспективна техника за постизање уштеде енергије у енергетски ефикасним EPON мрежама. Ипак, треба водити рачуна да увођење додатних техника не наруши квалитет сервиса QoS (енгл. *Quality of Service*) и тиме угрози развој и перспективу енергетски ефикасних EPON мрежа. Дакле, да би се добио енергетски ефикасан EPON базиран на мултиплексирању по таласним дужинама – EE WDM EPON (енгл. *Energy Efficient Wavelength Division Multiplexing EPON*) потребно је свести потрошњу електричне енергије ONU јединица на нижи ниво и веома је важно то постићи без нарушавања гарантованог QoS-а.

WDM EPON мрежу чине OLT (енгл. *Optical Line Terminal*) јединица која се налази на локацији провајдера сервиса, а која је преко пасивног оптичког раздвајача/сабирача сигнала повезана са више различитих терминалних ONU јединица које се налазе на локацијама крајњих корисника. За пренос података се користи по једна таласна дужина за сваког корисника што изискује постојање подесивог примопредајника у свакој ONU јединици. Модификовани модел WDM EPON мреже у оквиру којег су рађена истраживања подржава пренос саобраћаја коришћењем четири таласне дужине. Самим тим се у OLT и ONU јединицама имплементирају четири примопредајника фиксних таласних дужина, по један за сваку таласну дужину. Да би систем могао да подржи пренос мултимедијалних апликација у модификованом моделу се имплементира директна подршка за квалитете сервиса тако што се дефинише веза између таласне дужине која се користи за пренос података и класе саобраћаја којој ти подаци припадају. Тако се врши додела по једне таласне дужине за сваку од три класе саобраћаја. Четврта таласна дужина у овој архитектури је резервисана за размену података између OLT-а и ONU јединица старије генерације у којима нису имплементирани технике за уштеду енергије, као и за пренос порука контролног протокола. У енергетски ефикасној WDM EPON мрежи потребно је пренос саобраћаја ка кориснику (енгл. *Downstream*) уредити на исти начин као и што је уређен и саобраћај од корисника (енгл. *Upstream*), тј. мултиплексирати га у времену – TDM (енгл. *Time Division Multiplexing*). Уз TDM природу саобраћаја ка кориснику и од корисника, могуће је имплементирати механизме за уштеду енергије у ONU јединицама. То се постиже преласком ONU у неактивно стање, тј. режим спавања (енгл. *Sleep mode*), пре и после додељеног временског слота за пренос саобраћаја од стране OLT-а у EE WDM EPON мрежи. Гашењем примопредајника и некоришћењем процесора ONU јединице у неактивном режиму могу остварити уштеду електричне енергије, а да се при томе не наруши гарантовани квалитет сервиса. У дисертацији су представљена три алгоритма за динамичку алокацију пропусног опсега – DBA (енгл. *Dynamic Bandwidth Allocation*) и сва три су заснована на раније представљеним DBA који омогућавају функционисање четвороканалне WDM EPON мреже. Први DBA, назван EE-FWPBA (енгл. *Energy-efficient Fixed Wavelength Priority Bandwidth Allocation*), додељује један заједнички временски слот ONU јединици за пренос саобраћаја све три класе саобраћаја. Следећи алгоритам, EE-DWPBA (енгл. *Energy-efficient Dynamic Wavelength Priority Bandwidth Allocation*) додељује појединачни временски интервал за сваку класу саобраћаја, тако да када ONU јединица заврши пренос саобраћаја по једној таласној дужини, она може ослободити ту таласну дужину за следећу ONU иако постоји активни пренос података других класа саобраћаја преко осталих таласних дужина, у њима додељеним временским слотовима. EE-FWPBA и EE-DWPBA су *offline* DBA алгоритми, док је EE-DWPBA-ASC (енгл. *Energy-efficient Dynamic Wavelength Priority Bandwidth Allocation with*

*Adaptive Sleep Cycle*) *online* DBA алгоритам. Овај DBA алгоритам има могућност доделе додатног пропусног опсега ONU јединици у оквиру једног циклуса спавања, који има променљиву дужину у зависности од тренутног броја пакета у баферима OLT-а и ONU јединица. Сврха овог DBA алгоритма је да подеси трајање циклуса спавања у зависности од оптерећења мреже како би пружио услугу крајњем кориснику без кршења строгих QoS захтева у свим могућим условима рада. У условима повећаног мрежног оптерећења, EE-DWPBA-ASC алгоритам покреће смањење трајања циклуса спавања, што резултира мањом уштедом енергије, али и мањим кашњењем пакета. У условима слабог оптерећења, повећање трајања циклуса спавања резултује значајним уштедама енергије, док је QoS ненарушен.

У овој дисертацији је предложена модификација управљачког MPCP (енгл. *Multi-Point Control Protocol*) протокола како би се размена саобраћаја између OLT-а и ONU јединица учинила ефикаснијом и истовремено прилагодила за примену енергетски ефикасних технологија уз висок ниво QoS перформанси. Поред тога се детаљно објашњавају предложени DBA алгоритми. Како би се проверила ефикасност предложених технологија једно поглавље је посвећено симулацијама енергетски ефикасних WDM EPON мрежа и представљени су резултати тих симулација у виду додатно унесеног кашњења пакета изазваног баферовањем саобраћаја и алоцираног пропусног опсега за симулиране сервисе. Добијени резултати потврђују да увођење ONU јединице у енергетски ефикасан режим рада не нарушава загарантовани QoS.

**Кључне речи:** Енергетска ефикасност, WDM EPON, TDM, Циклус спавања, MPCP, DBA, Симулациона анализа мреже

**Научна област:** Електротехника и рачунарство

**Ужа научна област:** Телекомуникације и физичка електроника – оптичке мреже

**УДК број:** 621.3

**Dissertation title:** Energy-efficient Ethernet passive optical networks based on Wavelength Division Multiplexing

**Abstract:** Achieving energy savings in Ethernet passive optical networks (EPONs) becomes key factor for further development of optical access networks since energy usage increases rapidly. In recent years various energy-saving technics have been proposed among which enabling optical network units (ONUs) sleep time has been recognized as very promising approach for achieving energy savings in energy-efficient EPONs. However, introduction of additional mechanisms can jeopardize the quality of service (QoS) performance of the network and as a result limit the deployment of energy-efficient EPONs. So, in order to obtain the energy efficient Wavelength Division Multiplexing EPON (WDM EPON) it is necessary to reduce an ONU's electrical power consumption to the lower level and it is very important to achieve this without any compromising the implemented QoS.

The WDM EPON network consists of an Optical Line Terminal (OLT) unit located at the location of the service provider, which is connected via a passive optical splitter to several different terminal ONU units located at the locations of end users. One wavelength is used for data transmission for each user, which requires the existence of an adjustable transceiver in each ONU unit. Dissertation approach uses the modified model of the WDM EPON network which supports traffic transmission using four wavelengths. Therefore, four transceivers of fixed wavelengths are implemented in OLT and ONU units, one for each wavelength. In order to the system support the transmission of multimedia applications, the modified model implements direct support for QoS by defining the relationship between the wavelength used for data transmission and the traffic class to which the data belongs. So, there is assignment of one wavelength for each of the three traffic classes. Fourth wavelength in this model is reserved for data exchange between OLT and ONUs that don't support energy savings, and for transmission of control protocol messages. In this WDM EPON architectures downstream traffic transfer is organized in the same way as upstream traffic – like Time Division Multiplexed (TDM) traffic. With TDM nature of downstream and upstream traffic it is possible to enable energy saving mechanisms in ONUs. It is done by putting ONU to inactive state (i.e. sleep mode) before and after the allocated time slot in four-channel model of WDM EPON. By shutting down the transceiver and not using the processor of the ONU in the inactive state, electricity can be saved in the ONU without compromising the guaranteed QoS. Three Dynamic Bandwidth Allocation (DBA) schemes are developed and those three schemes are based on early presented schemes for four-channel WDM EPON support. Energy-efficient Fixed Wavelength Priority Bandwidth Allocation (EE-FWPBA) scheme allocates common time slot to ONU for traffic transmission of all three traffic classes. Energy-efficient Dynamic Wavelength Priority Bandwidth Allocation (EE-DWPBA) scheme allocates individual time slot for each traffic class, so when ONU finish traffic exchange on one wavelength it can release that wavelength to next ONU while data transmission is still active on other one or two wavelengths. EE-FWPBA and EE-DWPBA are offline DBAs, while Energy-efficient Dynamic Wavelength Priority Bandwidth Allocation with Adaptive Sleep Cycle (EE-DWPBA-ASC) is online DBA. This DBA algorithm has the ability to allocate an additional bandwidth to the end user within a single sleep cycle whose duration changes depending on the current buffers occupancy. The purpose of this DBA algorithm is to tune the duration of the sleep cycle depending on the network load in order to provide service to the end user without violating strict QoS requests in all network operating conditions. In conditions of increased network load, the DBA algorithm initiates a decrease in the duration of the sleep cycle, which results in less energy savings, and reduces additional packet delay too. Under low load conditions, an increase in the duration of the sleep cycle results in significant energy savings, while QoS is still maintained.

In this dissertation it is suggested modification of multi-point control protocol (MPCP) in order to make data exchange between OLT and ONUs more efficient and to achieve energy



efficiency and high-level of QoS performances in the same time. After that, proposed DBA schemes are explained in detail. In order to evaluate our research, one chapter presents simulation results of energy-efficient WDM EPON in the form of additional packet delay induced by packets buffering and the achieved service bandwidth. Obtained results confirm that putting ONU unit in energy efficient operation mode does not degrade guaranteed QoS.

**Key words:** Energy-efficiency, WDM EPON, TDM, Sleep cycle, MPCP, DBA, Network simulation

**Scientific area:** Electrical and Computer Engineering

**Scientific subarea:** Telecommunications and Physical Electronics – Optical Networks

**UDK number:** 621.3

# Садржај

<b>1. Увод .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Пасивне оптичке мреже.....</b>	<b>5</b>
2.1. <i>Историја и еволуција пасивних оптичких мрежа .....</i>	<i>5</i>
2.2. <i>EPON .....</i>	<i>8</i>
2.3. <i>WDM EPON.....</i>	<i>9</i>
2.4. <i>MPCP протокол .....</i>	<i>14</i>
2.4.1. <i>Синхронизација EPON мреже и мерење RTT параметра .....</i>	<i>15</i>
2.4.2. <i>Аутоматско откривање.....</i>	<i>16</i>
2.4.3. <i>Додела пропусног опсега.....</i>	<i>19</i>
2.5. <i>Резиме.....</i>	<i>21</i>
<b>3. Четвороканална WDM EPON архитектура.....</b>	<b>23</b>
3.1. <i>FWPBA модел.....</i>	<i>26</i>
3.2. <i>DWPBA модел .....</i>	<i>29</i>
3.3. <i>Проширење MPCP протокола за подршку четвороканалне WDM EPON         архитектуре.....</i>	<i>32</i>
3.4. <i>Резиме.....</i>	<i>33</i>
<b>4. Технике за уштеду енергије у PON .....</b>	<b>34</b>
4.1. <i>Софтверске технике .....</i>	<i>34</i>
4.1.1. <i>ONU Power Shedding .....</i>	<i>34</i>
4.1.2. <i>ONU Dozing .....</i>	<i>34</i>
4.1.3. <i>ONU Sleep (ONU спавање).....</i>	<i>35</i>
4.1.4. <i>Променљива брзина преноса података.....</i>	<i>36</i>

4.2.	<i>Хардверске технике</i> .....	37
4.2.1.	Нова ONU архитектура .....	37
4.2.2.	Искоришћење оптичког шума .....	38
4.3.	<i>Резиме</i> .....	38
<b>5.</b>	<b>Енергетски ефикасна WDM EPON мрежа</b> .....	<b>39</b>
5.1.	<i>Реорганизација начина преноса саобраћаја у смеру ка кориснику</i> .....	40
5.2.	<i>Уштеда енергије увођењем ONU јединица у режим спавања</i> .....	41
5.3.	<i>Масовни начин (енгл. Batch-mode) преноса</i> .....	42
5.4.	<i>Фер додељивање временских слотова</i> .....	43
5.5.	<i>DBA алгоритми за EE WDM EPON</i> .....	43
5.5.1.	EE-FWPBA алгоритам.....	45
5.5.2.	EE-DWPBA алгоритам .....	47
5.5.3.	EE-DWPBA-ASC алгоритам.....	50
5.5.3.1.	Примарна додела пропусног опсега – <i>offline</i> део алгоритма .....	51
5.5.3.2.	Додатна додела пропусног опсега – <i>online</i> део алгоритма .....	52
5.5.3.3.	Адаптивни циклус спавања.....	53
5.6.	<i>Проширење MPCP протокола</i> .....	55
5.7.	<i>Преглед објављених DBA алгоритама за уштеду енергије у PON мрежама</i> .....	56
5.8.	<i>Резиме</i> .....	59
<b>6.</b>	<b>Симулација EE WDM EPON мреже</b> .....	<b>60</b>
6.1.	<i>Резултати симулација EE WDM EPON мреже са EE-FWPBA алгоритмом</i> .....	64
6.2.	<i>Резултати симулација EE WDM EPON мреже са EE-DWPBA алгоритмом</i> .....	67
6.3.	<i>Резултата симулација EE WDM EPON мреже са EE-DWPBA-ASC алгоритмом</i> . 71	
6.4.	<i>Резултати симулација EE WDM EPON мреже са брзином преноса података од 10 Gb/s</i> .....	76
6.5.	<i>Резиме</i> .....	77
<b>7.</b>	<b>Закључак</b> .....	<b>78</b>
	<b>Прилог</b> .....	<b>82</b>
	<b>Литература</b> .....	<b>86</b>
	<b>Списак слика</b> .....	<b>89</b>
	<b>Списак табела</b> .....	<b>91</b>
	<b>Индекс скраћеница</b> .....	<b>92</b>
	<b>Биографија аутора</b> .....	<b>95</b>
	<b>Библиографија проистекла из рада на докторској дисертацији</b> .....	<b>96</b>

# 1. Увод

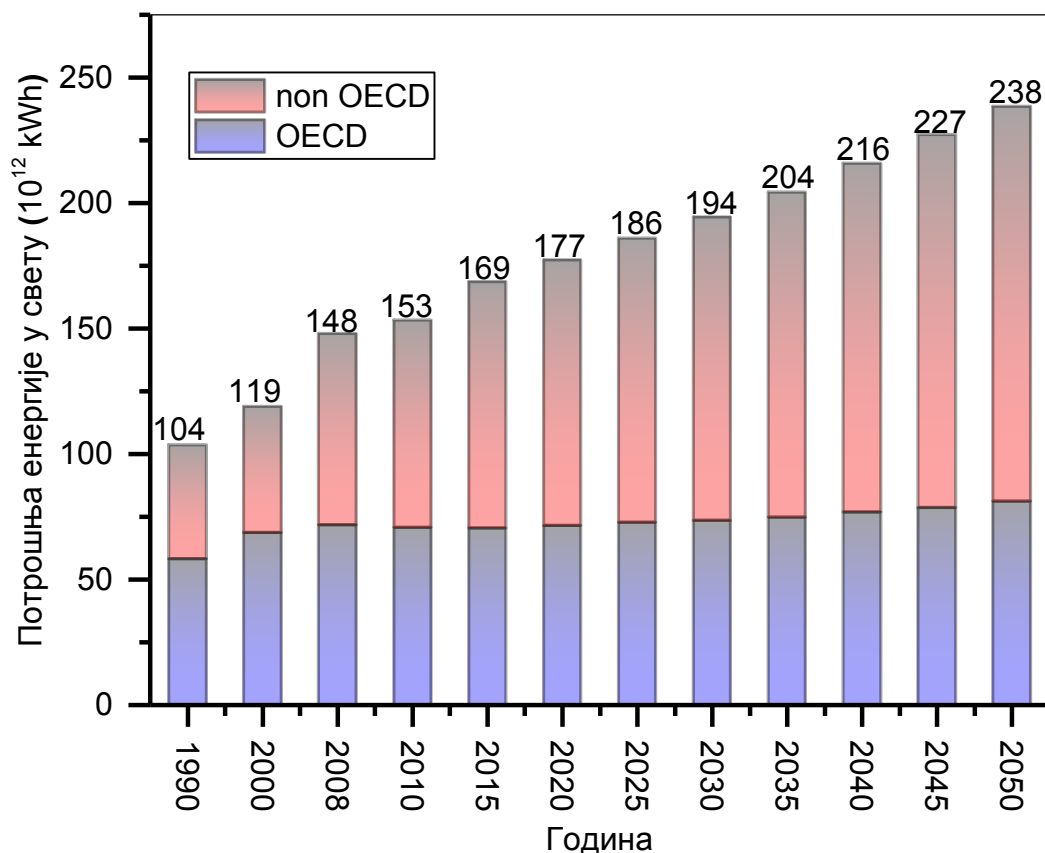
Интензивни развој NG-PON (енгл. *Next-Generation Passive Optical Network*), као једне од технологија у приступним мрежама чија се експлоатација највише очекује, је почео пре неколико година и очекује се да у блиској будућности ова технологије заузме значајну улогу у приступним мрежама.

Сведоци смо убрзаног развоја сервиса које свакодневно користимо и њихове експанзије. Наравно, са порастом самог броја сервиса евидентан је и све лакши и једноставнији приступ њима. Све више користимо паметне преносне уређаје за приступ интернету, па чак и у дому или у канцеларији где мобилност није неопходна. Осим тога, све више уређаја којима немамо директан приступ или се не користе за класичан кориснички приступ интернету за свој регуларан рад захтева управо приступ интернету. Тако у кући имамо „паметне“ телевизоре, утичнице, бојлере, у индустрији све више машина има могућност даљинског приступа преко интернета, док на улицама срећемо разне сензоре, паметне семафоре, еколошке уличне светилке, у пољопривреди самосвесне системе за наводњавање који се покрећу на основу аутоматски детектованих атмосферских прилика док се власник имања о свему томе обавештава путем апликација и интернет приступа. Мултимедијални сервиси су постали све више интерактивни док им је квалитет слике и звука у многоме повећан, и наравно приступа им се уз минимално кашњење. Са оваквим развојем сервиса неопходан је и развој инфраструктуре која може да подржи те сервисе. Телекомуникационе мреже су захваљујући том доста смањеном пропагационом кашњењу и великом пропусног опсегу инфраструктуре омогућиле да се увелико развијају самоходна моторна возила, дигитални отисци планете и виртуелна и интерактивна стварност. Телекомуникациона опрема која се уграђује приликом проширења или изградње нове инфраструктуре неминовно има више портова, има интерфејсе који подржавају веће линијске брзине преноса података, појачаваче који имају већу осетљивост и имају већа појачања ради премощавања дужих траса, веће степене одграновања како би се што већем броју корисника пружио приступ интернету и новим сервисима. Како крајњи корисници поседују све више уређаја којима је потребан широкопојасни приступ интернету, гранични чворови транспортних мрежа су сада физички све ближе локацијама корисника. То омогућава да приступна мрежа, било да је то бежична, оптичка или телефонска инфраструктура, све дубље продире ка крајњем кориснику и буде у много већој мери разграната. Све то изискује електричну енергију за рад, па самим тим са развојем интернет сервиса имамо и велики пораст потрошње енергије.

Не само у приступним мрежама, већ у целокупној телекомуникационој структури је евидентан пораст потребе за капацитетом, а са повећањем капацитета, тј. пропусног опсега, као последица се јавља и пораст електричне енергије. У времену када се целокупан свет бори за очување планете кроз разне еколошке пројекте и акције, које једним именом називамо Зеленим (енгл. *Green*) пројектима, неопходно је у тренутни развој NG-PON мрежа укључити и потребу за стварањем *Green* NG-PON мрежа.

Укупна потрошња енергије у целом свету 2050. године ће се по проценама Америчке енергетске информационе управе (енгл. *U.S. Energy Information Administration*) повећати за око 40% у односу на данашњу потрошњу [1]. Ова процена, заједно са пређашњом потрошње енергије [2], је графички приказана на слици 1.1, а на истом графику је приказан и однос укупне потрошње у земљама чланица OECD [3] (енгл. *Organisation for Economic Co-operation and Development*) и земаља ван OECD.

У корак са повећањем потрошње електричне енергије мора да иде и производња исте, што је у супротности са тежњом да се смањи и на одређени ниво доведе емисија штетних гасова у атмосферу. Због тога на свим пољима треба тежити ка смањивању потрошње електричне енергије. Студије у [4] показују да је удео савремених телекомуникационих мрежа у укупној потрошњи енергије чак 4%. Слично овом податку, новије студије у [1] потврђују да телекомуникационе мреже, лични рачунари и дата центри (енгл. *Data Centers*) имају удео у годишњој светској потрошњи електричне енергије од 4,6%, док годишња стопа раста потрошње за ове три кључне категорије интернет опреме износи око 7%.



Слика 1.1: Процена укупне потрошње енергије у свету од стране U.S. EIA [1][2]

Како оптичке мреже чине велики део целокупне интернет и телекомуникационе инфраструктуре, оне су посебно проучаване. Потребно је редизајнирати тренутне оптичке комуникационе системе у циљу смањења потрошње електричне енергије задржавајући при томе жељене перформансе тих система. Потрошња електричне енергије у транспортном делу чини око 30% укупне потрошне телекомуникационих мрежа, док опрема у приступним делу користи преосталих 70% [5]. Дакле потрошња енергије данашњег интернета, у највећој мери потиче од приступних мрежа. Неопходно је смањење емисије гасова који узрокују ефекат стаклене баште (гасова који задржавају топлоту у атмосфери) услед све веће употребе интернета. Данас је уштеда енергије постала један од најважнијих захтева за телекомуникационе мреже следеће генерације. Уштеда енергије постаје још важнија како технологије приступних мрежа еволуирају у следећу генерацију са већим брзинама преноса података и већим бројем корисника. Имајући у виду да приступне мреже троше око 70% укупне потрошње интернет опреме, уштеда енергије постаје једна од кључних тачака за даљи развој приступних мрежа следеће генерације. Пасивне оптичке мреже – PON (енгл. *Passive Optical Network*) тренутно се сматрају технологијом која може корисницима да пружи велике брзине преноса података, а и која је истовремено енергетски ефикаснија од својих претходника (нпр. ADSL (енгл. *Asymetric Digital Subscriber Line*) и VDSL (енгл. *Very high-speed Digital Subscriber Line*)) [6].

Уштеди енергије у телекомуникационим мрежама се посвећује доста пажње и од стране индустрије и од стране академских институција. У овој дисертацији је најпре дат преглед већ објављених могућности и начина за уштеду енергију, а сви ти истраживачки радови имају за циљ смањење потрошње енергије у NG-PON мрежама. Начини се огледају у месту примене мера за уштеду енергије, да ли софтверски или хардверски, док се у тренутним протоколима, оптичким уређајима и електронским елементима огледају могућности за спровођење поменутих начина. Применом предложених механизма установљено је да се може постићи уштеда енергије од чак 90%. Такође, приликом имплементације механизма за уштеду енергије треба водити рачуна да се тиме не наруши квалитет сервиса које користи крајњи корисник. Доста пажње у раду је посвећено управо томе, да се постигне значајна уштеда енергије у PON мрежама уз пружање гарантованог QoS (енгл. *Quality of Service*).

У докторској дисертацији се предлаже коришћење механизма за уштеду енергије у телекомуникационој опреми која се налази на локацији корисника. У ту сврху је најпре предложена реорганизација начина преноса пакета у EPON приступној мрежи. Контрола преноса пакета и активације механизма за уштеду енергије у опреми на локацији корисника се врши од стране централног елемента EPON мреже лоцираног на локацији провајдера. Одабрана архитектура EPON мреже за имплементацију механизма за уштеду енергије је четвороканална WDM EPON мрежа представљена у [7]. За разлику од широко распрострањеног приступа по коме се расподела таласних дужина у систему везује за појединачне кориснике, у [7] је представљен нови приступ алоцирања таласних дужина у коме се расподела истих везује за класу саобраћаја који се преноси у мрежи. На тај начин се проблем имплементације квалитета сервиса у WDM EPON мрежама повезује и истовремено решава са алокацијом таласних дужина чиме се умањује комплексност опреме као и потрошња електричне енергије јер се користи знатно мањи број оптичких примопредајника. Додатна, као и већинска, уштеда енергије у четвороканалном WDM EPON-у се постиже додатним TDM (енгл. *Time Division Multiplexing*) реорганизовањем и груписањем саобраћаја ка кориснику (енгл. *Downstream*) и применом механизма за уштеду енергије чиме се добија Енергетски Ефикасна WDM EPON мрежа – EE WDM EPON.

Дисертација предлаже измене у стандардизованом MPCP (енгл. *Multi-Point Control Protocol*) протоколу за контролу комуникације и размене саобраћаја. Овај протокол је описан IEEE 802.3ah стандардом [8] а измене у структури његових контролних оквира би омогућиле имплементацију механизма за уштеду енергије. Потом се представљају и анализирају три

DBA (енгл. *Dynamic Bandwidth Allocation*) алгоритма који на међусобно различит начин управљају доделом пропусног опсега и временског слота за пренос саобраћаја сваког корисника у EE WDM EPON мрежи, водећи притом рачуна да се не наруши гарантовани квалитет сервиса. За сваки од предложених DBA алгоритама је представљен математички модел, графичка илустрација размене контролних порука и саобраћаја, као и анализа функционисања система приликом њихове имплементације. Такође је и за сваки од предложених DBA алгоритама урађена симулациона анализа направљена у програмском језику C (енгл. C) како би се испитале могућности и перформансе овако реализованих енергетски ефикасних приступних мрежа. Ради квалитетног поређења перформанси симулираних система, улазни параметри симулација, као што су број корисника, пружени пакети сервиса, брзине преноса, оптерећеност мреже и остало, за сва три алгоритма су били идентични.

Докторска дисертација је форматирана у седам поглавља, укључујући и овај увод. Након увода су представљене пасивне оптичке мреже и њихова еволуција кроз историју, с посебним освртом на EPON мреже. Потом се у следећем поглављу представљају до сада презентоване технике и механизми за уштеду енергије у PON мрежама. Након тога се представља одабрана WDM EPON архитектура у којој је предвиђена примена механизма за уштеду енергије, као и основни а потом и проширени MPCP протокол за размену контролних пакета унутар EPON система. Следи представљање EE WDM EPON мреже, њене архитектуре, начина преноса саобраћаја, DBA алгоритама који омогућују енергетски ефикасан рад мреже и наравно самих механизма за уштеду енергије који су имплементирани у EE WDM EPON-у. Претпоследње поглавље описује симулације помоћу којих су анализирани перформансе представљених EE WDM EPON мрежа. Наведени су сви параметри и услови симулација као и граничне вредности параметара који морају бити испуњени како се не би нарушио квалитет сервиса. Такође су представљени резултати симулација у виду додатно унесених кашњења због баферисања саобраћаја ка кориснику, варијације кашњења пакета – џитера (енгл. *jitter*), остварени пропусни опсег, губитак пакета по класама саобраћаја и сервисима, остварена уштеда енергије, проценат времена које су елементи мреже провели у неактивном стању, оптерећености бафера током симулација, итд. Сви резултати, за сва три алгоритма, су представљени графички и табеларно, а потом су и поређени и анализирани како би се извели закључци о предностима предложених алгоритама. На крају докторске дисертације, у седмом поглављу, су изведени закључци на основу добијених резултата симулације, истакнуто је колике су могућности за уштеду енергије у EPON мрежама, дискутовани су резултати у погледу квалитета сервиса и истакнут је значај и главни допринос ове дисертације.

## 2. Пасивне оптичке мреже

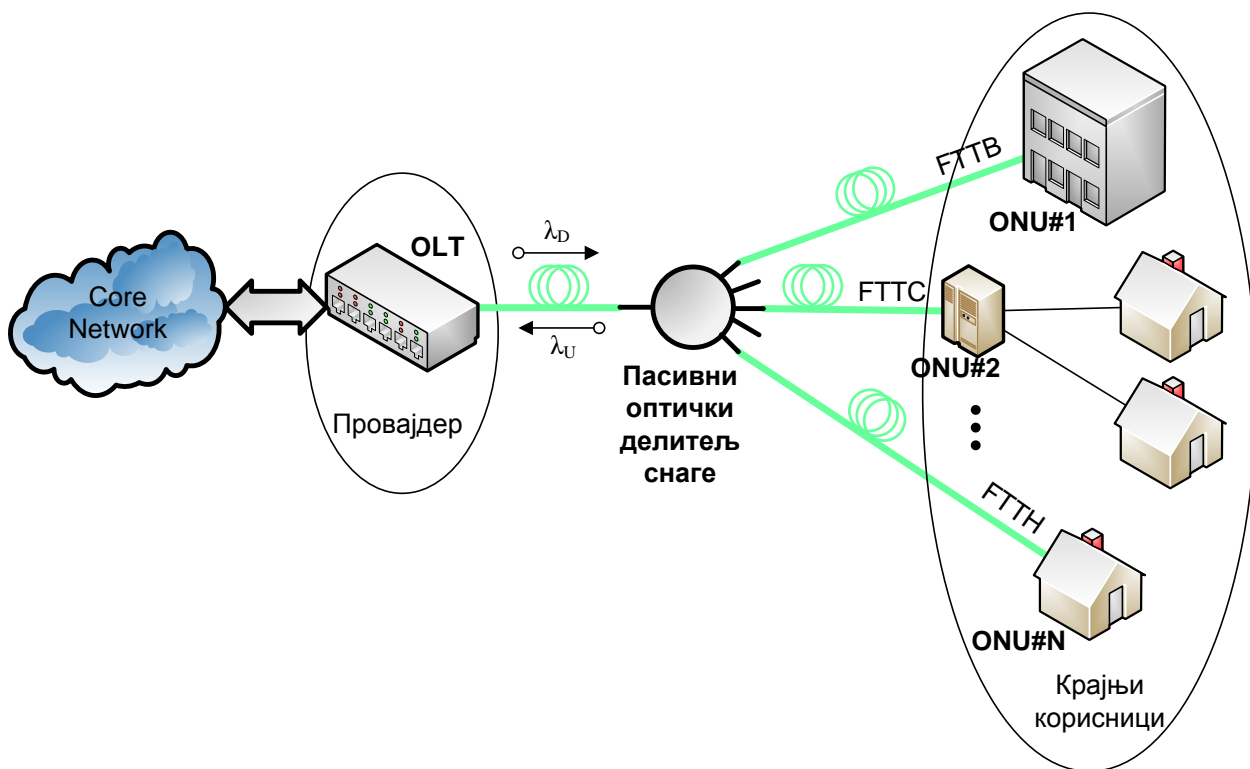
### 2.1. Историја и еволуција пасивних оптичких мрежа

Пасивна оптичка мрежа (PON) је телекомуникациона технологија која се користи за пружање сервиса крајњим корисницима, било пословним било резиденцијалним. Архитектура ове приступне технологије је реализована у топологији „тачка-више тачака“. Пасивни оптички делитељи снаге – сплитери (енгл. *splitter*) се користе како би се омогућило да се оптички сигнал са једног влакна подели на више сигнала и дистрибуира до више крајњих корисника. Ови пасивни елементи мреже се такође користе као и оптички сабирачи снаге сигнала од више крајњих корисника. Опрема неопходна за реализацију PON-а су и оптички линијски терминал – OLT (енгл. *Optical Line Terminal*) и бројне оптичке мрежне јединице – ONU (енгл. *Optical Network Unit*). OLT се поставља у просторијама пружаоца услуга и сервиса – провајдера (енгл. *Internet Service Provider - ISP*), док се ONU налази на локацији крајњег корисника. На слици 2.1 је приказана PON топологија. PON смањује потребну количину оптичких влакана у односу на „тачка-тачка“ топологију, јер је влакно које повезује сплитер и OLT дељени ресурс за све кориснике. PON користи једну таласну дужину за пренос оптичког сигнала у смеру од провајдера, тј. OLT-а, ка крајњим корисницима (овај смер преноса се назива смер ка кориснику) и другу таласну дужину за пренос оптичког сигнала у смеру од крајњих корисника до провајдера сервиса (енгл. *upstream*) преко истог оптичког влакна.

Водећи светски провајдери и произвођачи телекомуникационе опреме (вендори (енгл. *vendor*)) су 1995. године оформили радну групу FSAN (енгл. *Full Service Access Network*) ради развоја FTTH (енгл. *Fiber To The Home*) архитектуре. Рад ове групе је наставила Међународна Телекомуникациона Унија - ITU (енгл. *International Telecommunications Union*) што је резултовало ITU-T G.983 стандардом који дефинише PON заснован на АТМ (енгл. *Asynchronous Transfer Mode*) транспортном протоколу – APON. Пренос информација у мрежи се одвија брзином од 155 Mb/s.

Даља побољшања APON-а су резултирала новом фамилијом ITU-T G.983 препорука [9] који дефинише широкопојасни PON – BPON (енгл. *Broadband PON*). Брзине преноса података у BPON-у су 622 Mb/s (STM4) у смеру ка кориснику и 155 Mb/s (STM1) у смеру од корисника.





Слика 2.1: PON топологија

Истраживања радне групе FSAN на тему PON-а са брзинама преноса преко 1 Gb/s су 2003. године резултирала серијом ITU-T G.984 [10] стандарда који описују GPON (енгл. *Gigabit-capable PON*). Стандарди дозвољавају неколико брзина преноса, али се у пракси исконвергирало ка 2,5 Gb/s у смеру ка кориснику и 1,25 Gb/s у смеру од корисника.

Као део IEEE 802.3 пројекта „Етернет у првој миљи“ 2004. године је представљен EPON (енгл. *Ethernet PON*). EPON је дефинисан стандардом 802.3ah [8]. EPON је приступна мрежа која користи етернет пакете, тј. стандардне 802.3 етернет фрејмове, за симетрични 1 Gb/s пренос (у смеру ка кориснику и од корисника). EPON комбинује предности PON-а и ширококораспрострањеног етернета.

Напредак у широкопојасним технологијама је узрокован повећаним бројем активно повезаних паметних уређаја, појавом сервиса за стриминг (енгл. *Streaming*), 4K/8K видео сервиса и виртуелну реалност, као и развојем 4G и 5G мобилних мрежа. Зато је неопходно да се започне са развојем и имплементацијом нових PON технологија које могу подржати и пратити даљи развој широкопојасних технологија и сервиса.

10 Gb/s EPON, тј. 10G-EPON, је потврђен IEEE 802.3av стандардом [11] у оквиру IEEE 802.3 2009. године. 10G-EPON подржава 10 Gb/s пренос података у смеру ка кориснику и 1 Gb/s у смеру од корисника. У 10G-EPON је могућ истовремени симултани пренос података у смеру ка кориснику и за 10 Gb/s и за 1 Gb/s саобраћај захваљујући коришћењу различитих таласних дужина за IEEE 802.3av и IEEE 802.3ah пакете. Ово омогућава коегзистирање EPON-а и 10G-EPON-а на истој PON архитектури. Такође, IEEE 802.3av стандард дефинише и симетрични 10G-EPON где су брзине преноса и у смеру ка кориснику и у смеру од корисника 10 Gb/s.

FSAN и ITU су 2010. године дефинисали NG-PON1 (енгл. *Next Generation PON 1*) кроз серију ITU-T G.987 препорука [12]. Општи захтев NG-PON1 је да обезбеди веће брзине преноса података од GPON-а. Поред тога, провајдери очекују да ће NG-PON1 користити

постојећу оптичку инфраструктуру. Стога су FSAN и ITU подржали компатибилност NG-PON1 са наслеђеним GPON технологијама. Дефинисани NG-PON1 се зове и XG-PON (енгл. *10 Gigabit-capable PON*). У XG-PON брзина преноса података је 10/2,5 Gb/s у смеру ка кориснику/од корисника.

XGS-PON (енгл. *10 Gigabit-capable Symmetric PON*) иако звучи слично као XG-PON није надоградња ове архитектуре и значајне разлике постоје. ITU-T G.9807 препорука [13] описује оптичку приступну мрежу у којој су протоци симетрични у смеру ка кориснику и у смеру од корисника, односно 10/10 Gb/s. Потреба за симетричним протоцима постаје неопходна због тренутног развоја сервиса. Да би се постојећи корисници и постојеће GPON мреже припремиле за миграцију на будуће архитектуре, операторима се као прелазно решење нуди XGS-PON који поред симетричног преноса података подржава и асиметричне 10/2,5 Gb/s и 2,5/1,25 Gb/s. Мало пре представљања XGS-PON, ITU-T G.989 препорукама [14] је од стране FSAN групе дефинисана NG-PON2 мрежа, која за разлику од NG-PON1 мреже треба лакше да интегрише кориснике претходних генерација (GPON, XG-PON, XGS-PON) и притом обезбеди новим корисницима симетрични пренос података брзинама од 40/40 Gb/s. То је предвиђено реализовати коришћењем TDM и WDM технологија, названо TWDM (енгл. *Time- and Wavelength-Division Multiplexing*), тако што би се у смеру ка кориснику користило WDM мултиплексирање четири таласне дужине преноса по 10 Gb/s, а у смеру од корисника би се користио 10 Gb/s TDM приступ. XGS-PON је практично NG-PON2 без WDM-а, без тјунабилних ласера. С гледишта оператера, тј. с техноекономске стране, XGS-PON треба у будућности да представља исплатив начин за миграцију широкораспрострањеног GPON тржишта ка симетричној и TWDM NG-PON2 архитектури.

У документу [15] из 2015. године IEEE 802.3 радна група даје правце будућег развоја EPON архитектура. Иако 10G-EPON мреже тек улазе у експлоатацију, аутори извештаја на основу сазнања и ослушкивања развоја индустрије очекују да ће у блиској будућности бити потражње за још већим пропусним опсегом, како се повећавају захтеви и за резиденцијалне и за пословне сервисе. Аутори документа су навели два приступа развоју следеће генерације EPON-а: мултиплексирање по таласним дужинама (по четири таласне дужине и у смеру преноса ка кориснику и у смеру преноса од корисника) са агрегацијом саобраћаја ка кориснику капацитета од најмање 40 Gb/s (40G-EPON) уз потенцијално проширење до 100 Gb/s (100G-EPON) и једноканални EPON (једна таласна дужина и у смеру преноса ка кориснику и у смеру од корисника) који би подржао симетричне брзине преноса од најмање 25 Gb/s (25G-EPON) или асиметрични пренос 25/10 Gb/s (25/10G-EPON). Ипак, 2020. године је радна група предложила IEEE 802.3са стандард [16] који промовише једноканални симетрични 25 Gb/s EPON (25G-EPON) и новину у односу на раније – 50 Gb/s EPON (50G-EPON) који за симетрични пренос користи по две таласне дужине протока од по 25 Gb/s. Предвиђено је да се омогући коегзистенција на истом влакну постојећег 10G-EPON-а са будућим 25G-EPON и 50G-EPON архитектурама. За разлику од вишеканалног NG-PON2, будуће EPON архитектурама неће бити потребни тјунабилни оптички елементи, па је самим тим развој једноставнији и јефтинији него код NG-PON2. Такође, максимална брзина преноса у систему је 50 Gb/s у односу на тренутне NG-PON2 системе где је дизајнирана брзина преноса 40 Gb/s. Тренутно је IEEE 802.3са стандард у фази проучавања и верификације од стране водећих светских вендора телекомуникационе опреме, од којих ипак зависи финални изглед стандарда као и развој и имплементација нових EPON система.

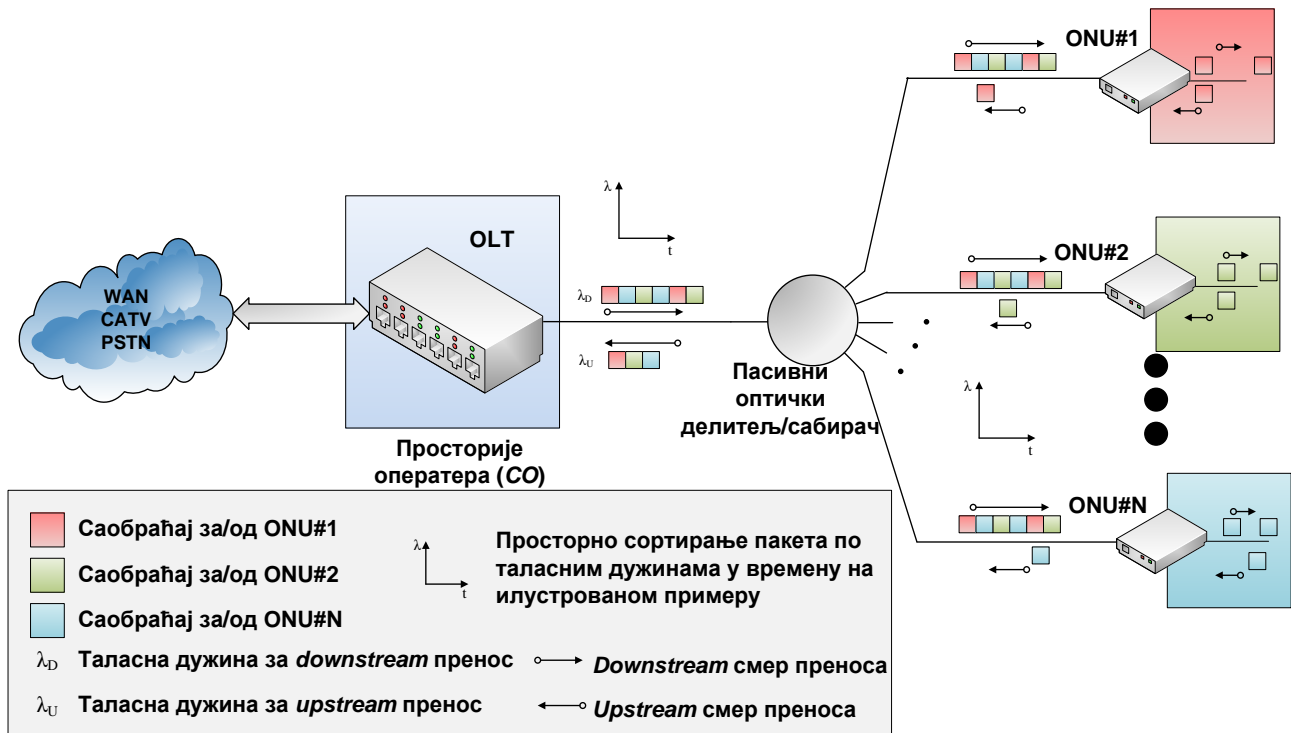
EPON и GPON су широко имплементирани широм света од 2010. године [17]. Након дугогодишње изградње оптичке инфраструктуре, многе земље су активно укључене у развој FTTH технологија. Са ширењем услуга и све већим захтевима корисника за ширином пропусног опсега, 10G-EPON и XG-GPON такође су имплементирани у великој мери од 2016. године.

## 2.2. EPON

Етернет пасивна оптичка мрежа – EPON је телекомуникациони „тачка-више тачака“ (енгл. *point-to-multipoint*) систем за пренос података између централног управљачког елемента – OLT и више крајњих елемената – ONU јединица. OLT је са ONU јединицама повезан преко једног оптичког влакна и пасивног делитеља/сабирача снаге. Оптичко влакно и делитељ снаге чине оптичку дистрибутивну мрежу – ODN (енгл. *Optical Distribution Network*) која треба да повеже кориснике, тј. ONU јединице, са OLT-ом на удаљености до 20 km. Топологија у којој се праве EPON мреже је стабло (енгл. *tree*), што је приказано на слици 2.2.

Број ONU јединица који је могуће повезати на OLT у оквиру једне мреже зависи од степена дељења пасивног делитеља снаге и он је минимално 32 (за степен дељења 1:32). Ово није ограничавајући параметар јер су у EPON-у подржани и пасивни делитељи 1:64 и 1:128. Више ONU јединица од 128 се у пракси не среће због буџета оптичке снаге који је за степен дељења 1:128 и дomet мреже 20 km износи најмање 29 dB (21 dB је слабљење делитеља, 5 dB слабљење оптичког влакна и 3 dB је системска маргина).

EPON је једноканална (енгл. *single-channel*) мрежа пошто се за пренос саобраћаја користи по једна таласна дужина за сваки смер преноса, тј. нема мултиплексирања по таласним дужинама у истом смеру преноса. Пренос података се у смеру ка кориснику, тј. од OLT-а ка ONU јединицама обавља на таласној дужини 1490 nm. За пренос у смеру од корисника ONU јединице користе ласере који врше емисију сигнала таласне дужине од 1310 nm. Проток података, тј. етернет пакета, се врши битским протоком од 1 Gb/s. Због линијског кодовања 8b/10b проток на физичком слоју је 1,25 Gb/s, па је ово уједно и линијска брзина на којој раде ласери у EPON-у. Величина етернет пакета у EPON мрежама је варијабилне величине и она може бити до 1518 бајтова, као што је и специфицирано IEEE 802.3 стандардом. Како је у приступним мрежама доминантан тип саобраћаја управо етернет саобраћај, ова могућност променљиве величине пакета погодује IP природи саобраћаја због ефикасности преноса, што није случај у другим пасивним оптичким мрежа где се сав



Слика 2.2: Топологија EPON мреже и илустрација начина преноса саобраћаја

саобраћај енкапсулира у хелије фиксне величине.

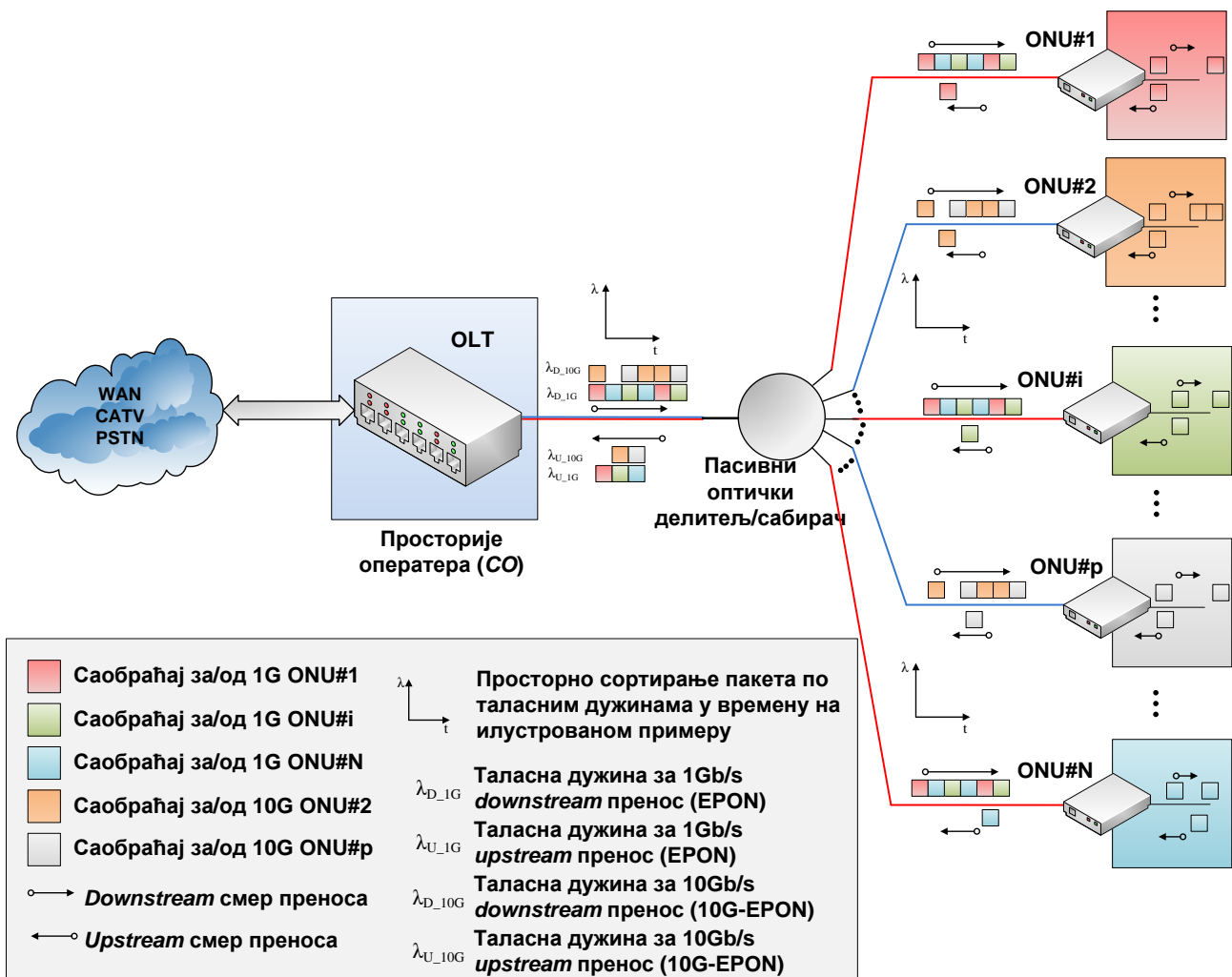
За пренос података у смеру ка кориснику EPON користи емисионо слање пакета свим ONU јединицама (енгл. *broadcast*), а ONU јединице на основу поља у преамбули IEEE 802.3 оквира распознаје који пакет је послат баш њој и те пакете даље процесира док се остали пакети одбацују. Пошто је ODN заједнички медиј, када би истовремено више ONU јединица слало пакете на истој таласној дужини преко ODN-а дошло би до колизије. Како би се то избегло у смеру преноса од корисника се свакој ONU јединици додељује временски слот у којем јој је дозвољено да шаље пакете. Почетак и трајање временског слота за сваку ONU јединицу одређује OLT применом неке од шема за алокацију пропусног опсега. Увођењем оваквог временског мултиплекса, тј. TDM приступа, у смеру преноса од корисника се елиминише могућност колизије пакета. Начин размене саобраћаја у EPON мрежи је илустративно приказан на слици 2.2.

У литератури се поред EPON назива могу срести и GEPON и 1G-EPON називи и они се односе на мреже код којих се оптички пренос података у систему одвија брзином од 1 Gb/s. Термини 10GEPON и 10G-EPON се односе на оптичке приступне EPON мреже у којима је брзина рада оптичких примопредајника 10 Gb/s. Симетрични 10G-EPON подразумева оптички пренос података од 10 Gb/s у оба смера преноса, односно и OLT и ONU јединице поседују ласере који емитују сигнале протока 10 Gb/s. Асиметрични 10G-EPON се односи на EPON системе у којима OLT пакете шаље битском брзином од 10 Gb/s, док ONU јединице имају предајнике који раде на 1 Gb/s. Таласне дужине оптичких 10 Gb/s предајника које се користе у 10G-EPON мрежи су 1270 nm у смеру преноса од корисника (ласери ONU јединица) и 1577 nm у смеру ка кориснику (ласер OLT-а), и оне се разликују од таласних дужина на којима ради EPON. Због употребе различитих таласних дужина у 10G-EPON и EPON системима могућ је истовремени рад обе архитектуре преко исте оптичке инфраструктуре (vlakно и оптички делитељ снаге). Пример овакве оптичке приступне мреже је дат на слици 2.3.

Додавањем нових ONU јединица које подржавају 10 Gb/s пренос и надоградњом или заменом постојећих OLT-ова код провајдера, а без икаквих промене код оперативних 1 Gb/s ONU јединица, могуће је проширити капацитет постојеће приступне архитектуре. Постојећи корисници 1 Gb/s услуга заменом својих ONU јединица могу прећи на експлоатацију 10G-EPON-а, а самим тим добити и приступ новим сервисима који захтевају већи капацитет. На овај начин се може извршити постепена миграција са EPON система на 10G-EPON систем. Ова карактеристика EPON система је значајан фактор провајдерима који због овога могу флексибилно да планирају надоградњу својих постојећих EPON мрежа без изградње нове инфраструктуре уз јефтина улагања у опрему и то не за целу мрежу већ само тамо где је потребно проширење и обезбеђивање нових капацитета.

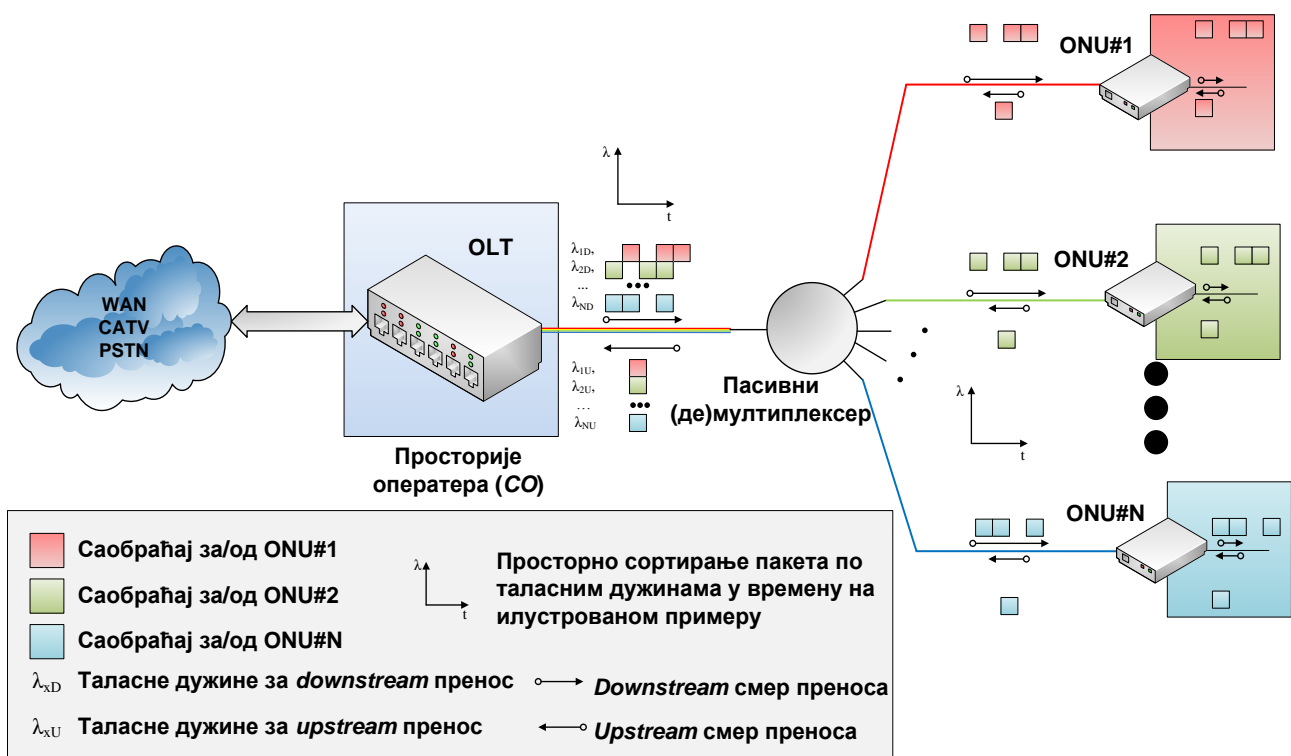
## 2.3. WDM EPON

Због подршке за пренос мултимедијалних апликација и сервиса који су у непрестаном ширењу и развоју, и проширење и развој EPON архитектура је такође у константном процесу. Како би се у приступним мрежама обезбедио довољан капацитет за постојеће и будуће захтеве сервиса неопходно је на неки начин повећати укупни капацитет EPON-а, али уз истовремену интеграцију постојећих ONU јединица као и оних старијих генерација које су већ присутне и раде у мрежи.



Слика 2.3: Имплементација функционисања EPON и 10G-EPON архитектуре преко заједничке оптичке инфраструктуре

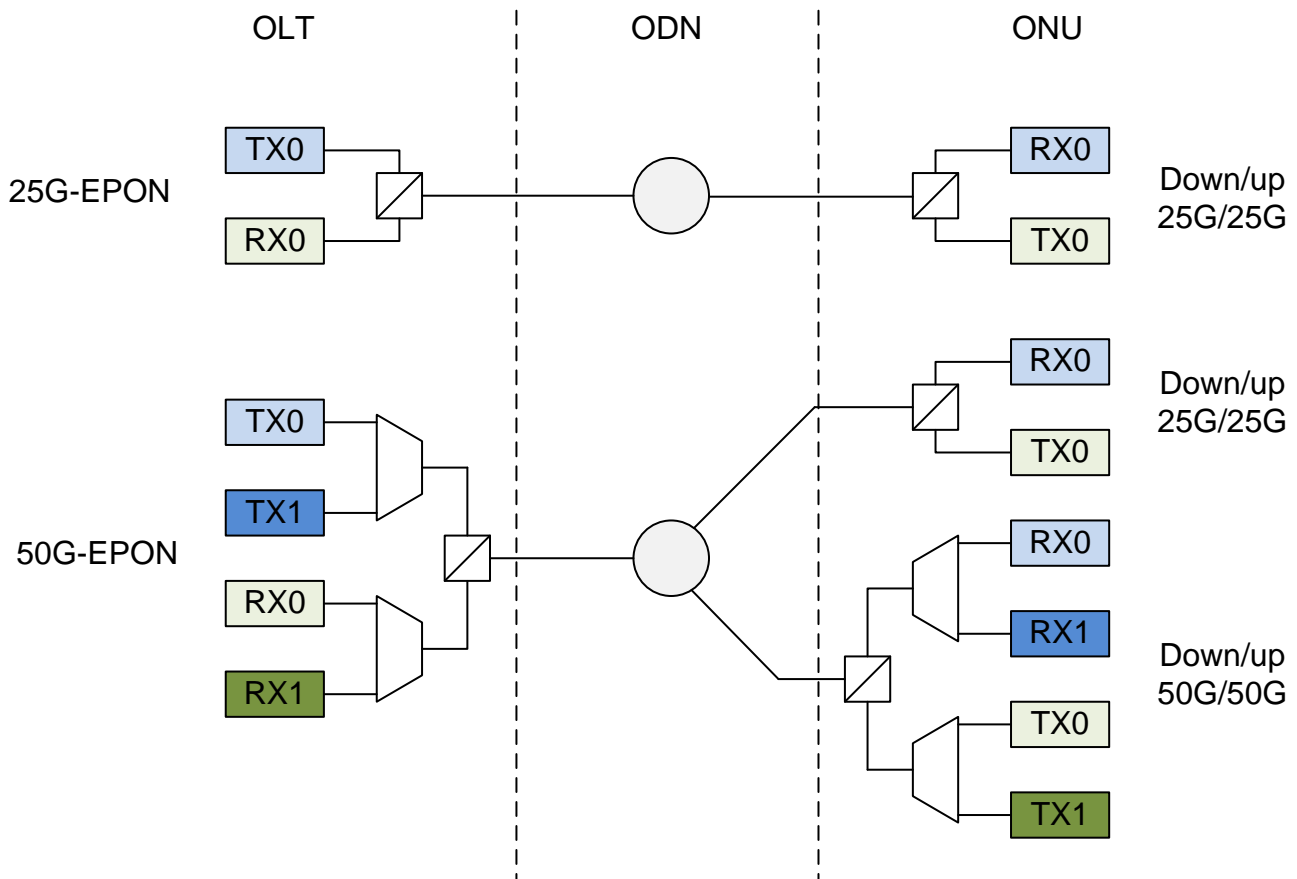
Уопштена дефиниција WDM PON мреже подразумева да свака ONU јединица ради на другој таласној дужини. У овом случају архитектура WDM PON-а је иста као и архитектура свих једноканалних PON мрежа с тим што сада имамо на оптичком влакну рад више таласних дужина у истом смеру преноса. Генерална архитектура овакве WDM PON мреже је приказана на слици 2.4. Оваквим повезивањем ONU јединице и OLT-а практично се добија „тачка-тачка“ (енгл. *point-to-point*) веза између њих преко посебне таласне дужине. У овој виртуелној „тачка-тачка“ архитектури је управљање физичким слојем поједностављено јер практично нема више дељеног медијума и свака таласна дужина може да преноси саобраћај различитом брзином и применом различитог протокола. Такође се омогућава и значајно већи пропусни опсег, имплементација различитих протокола, једноставно додавање нових корисника и проширење мреже као и имплементација квалитета сервиса. Ипак, имплементација оваквог решења је изузетно скупа за приступне мреже због примене мноштва тјунабилних ласера или великог броја фиксних ласера у OLT-у, као и тјунабилних ласера у ONU јединицама без којих би рад и одржавање мреже били изузетно комплексни, а притом би вероватно и велики део укупног пропусног опсега остао неискоришћен.



Слика 2.4: WDM EPON у којем се размена саобраћаја са сваком ONU јединицом врши преко независне таласне дужине

У документу [15] се предлажу два правца за развој будућих EPON мрежа. Први је задржавање једноканалне архитектуре мреже уз повећање брзине преноса саобраћаја са 10 Gb/s на 25 Gb/s и добијањем 25G-EPON мреже. Други правац је претварање тренутног једноканалног 10G-EPON-а у четвороканални тако што би се преко сваке од четири таласне дужине (по смеру преноса саобраћаја) преносио саобраћај брзином 10 Gb/s па би се тако добио 40G-EPON. У будућности би се 40G-EPON претворио у 100G-EPON додавањем још шест таласних дужина у систем. Проблем који се јавља овде је додавање нових елемената у ODN који би увели WDM технологију у EPON. То су WDM мултиплексери и демултиплексери који имају неко своје унутрашње слабљење па би се укупан оптички буџет снаге нарушио, или би се морао смањивати степен дељења пасивних делитеља снаге (што би ограничило повећање броја ONU јединица у систему). Како би се постигао разумно висок степен дељења (1:64 или 1:128) и задовољио буџет снаге у WDM EPON-у решење се може наћи у примени AWG (енгл. *Arrayed Waveguide Gratings*) елемената. То би захтевало замену пасивних делитеља снаге и инсталирање AWG елемената у ODN-у што подразумева радове на оптичкој инфраструктури. Због тежње да EPON приступни системи буду јефтини и да се при њиховој надоградњи користи постојећа оптичка инфраструктура увођење AWG елемената би значајно утицало на техно-економску исплативост нових генерација WDM EPON мрежа.

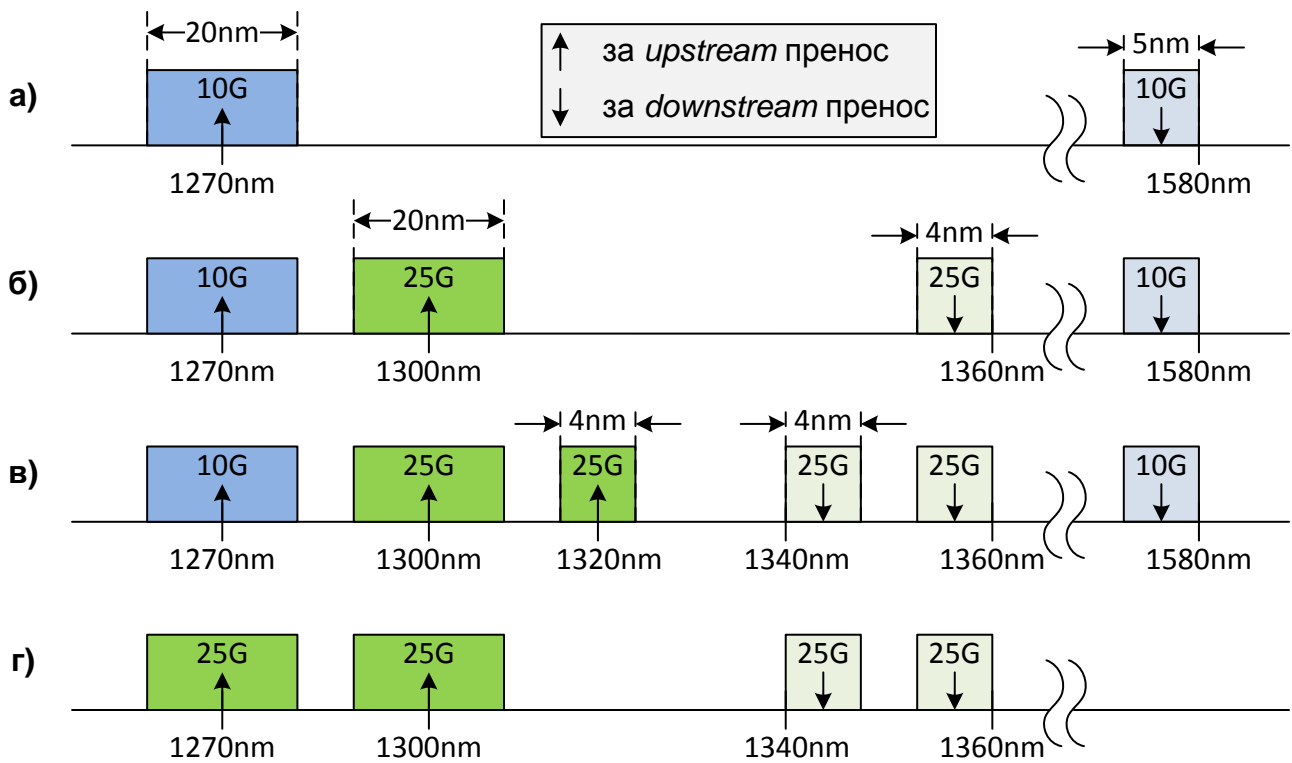
Ипак, у предлогу IEEE 802.3ca стандарда [16] се за нове сервисе представљају 25G-EPON и 50G-EPON системи. 25G-EPON је једноканална EPON структура, као она која је раније предлагана у [15]. Нови правац развоја који предлог стандарда доноси је двоканална 50G-EPON мрежа која ће користити две таласне дужине (по смеру преноса саобраћаја) које ће се разликовати од таласних дужина које се користе у старијим EPON генерацијама (1G-EPON и 10G-EPON). Нове EPON мреже ће радити са истим степеном дељења снаге у ODN-у и подржавати пренос на исте дистанце (до 20 km) као и постојећи EPON-ови. За разлику од NG-PON2 мрежа које користе више таласних дужина, овде неће бити потребна употреба тјубнабилних оптичких примопредајника у ONU јединицама да би се подржао рад на две таласне дужине на којима се врши 25 Gb/s пренос, па се предвиђа да ће и развој бити



Слика 2.5: Архитектуре 25G-EPON и 50G-EPON система предложених у [16]

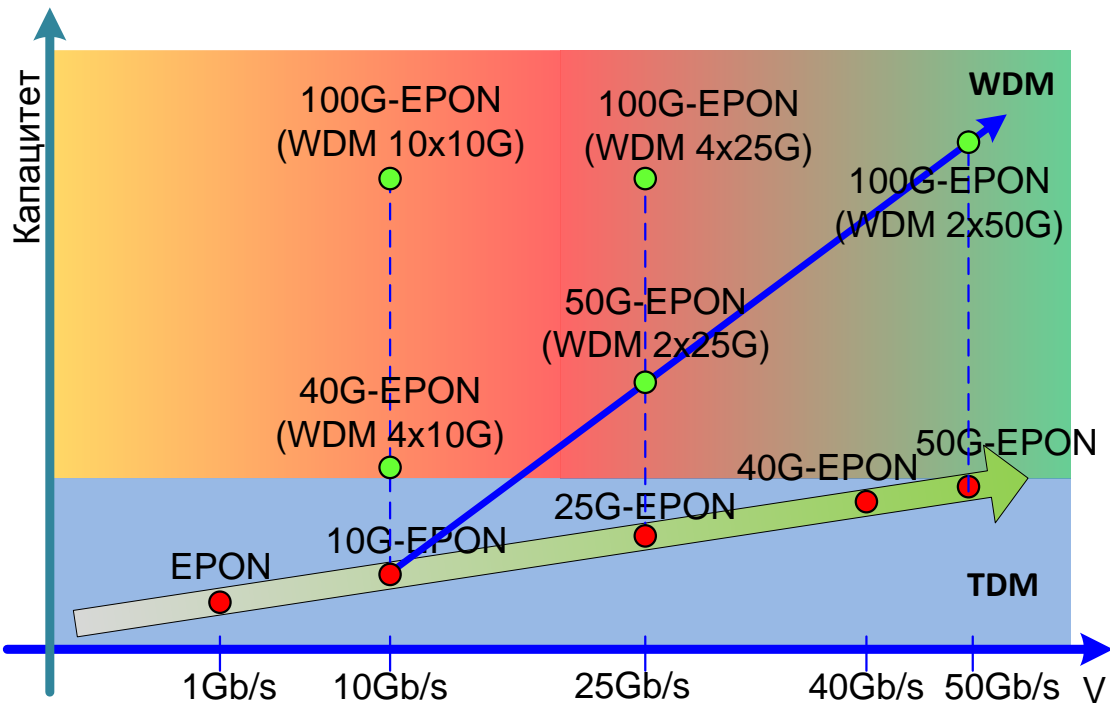
јефтинији. Архитектура стандардом предложених 25G-EPON и 50G-EPON мрежа је приказана на слици 2.5. У [16] се наводи да је подржано да на истом влакну са 25G-EPON и 50G-EPON мрежама коегзистира и 10G-EPON. Расподела таласних дужина у оптичком спектру која ће омогућити то коегзистирање је приказана на слици 2.6.

IEEE радна група при изради IEEE 802.3ca је првобитно за циљ имала план да развије 100G-EPON као и 25G- и 50G-EPON. Међутим, пут развија 4 x 25 Gb/s система је напуштен услед поменутих техно-економских препрека, тј. потешкоћа задржавања у оквиру буџета снаге у ODN-у и проналажења четири таласне дужине које би омогућиле интероперабилност по разумној цени.



Слика 2.6: Таласне дужина за пренос саобраћаја у 10G-EPON, 25G-EPON и 50G-EPON архитектурама

Историјски пут развоја EPON мрежа следеће генерације је илустративно приказан на слици 2.7.



Слика 2.7: Правци развоја EPON мрежа у погледу брзина преноса по таласним дужинама и коришћењу WDM технологије



## 2.4. MPCP протокол

MPCP дефинише механизам заснован на порукама за олакшавање размене информација у реалном времену између OLT-а и сваке ONU јединице у „тачка-више тачака“ – P2MP (енгл. *Point-to-Multi-Point*) EPON сегменту како би се обезбедио ефикасан пренос саобраћаја у смеру од корисника. MPCP не специфицира одређени приступ доделе ресурса, тј. алгоритам расподеле пропусног опсега, он пружа само основни механизам за примену широког спектра шема за расподелу пропусног опсега. Конкретан избор тих алгоритама и шема је препуштен произвођачу EPON опреме. MPCP је део MAC (енгл. *Media Access Control*) контролног слоја који је одговоран за генерисање порука и повезивање елемената мреже. Све MPCP контролне поруке су 64-бајтни MAC контролни оквири који се састоје од поља приказаних на слици 2.8. Функција приказаних поља је следећа:

Адреса одредишта (енгл. *Destination address*) је MAC адреса елемента којем се шаље оквир. У случају када се шање пакет свим елементима у мрежи у ово поље се уписује јединствена 48-битна вредност која презентује MAC *multicast* поруку.

Адреса изворишта (енгл. *Source address*) представља MAC адресу елемента мреже који је генерисао ту поруку, односно елемента који шаље тај оквир.

Дужина/тип поруке (енгл. *Length/type*) је 16-битна фиксна вредност која као таква служи као идентификатор MAC контролног оквира. Осим тога, и величина MAC порука које користи MPCP су увек дужине 64 октета па ово поље може увек да има фиксну вредност.

*Opcode* поље се користи за распознавање врсте MPCP поруке па тако имамо да вредност 0x01 означава PAUSE поруку, 0x02 означава GATE поруку, 0x03 означава REPORT поруку, 0x04 означава REGISTER\_REQ поруку, 0x05 означава REGISTER поруку, док је 0x06 за REGISTER\_ACK поруку. Која је функција сваке од ових MPCP порука ће бити описано у наставку.

Временски печат (енгл. *Timestamp*) служи за пренос вредности локаног MPCP часовника. Сваки елемент мреже приликом слања поруке уписује време када је започето слање првог октета одредишне адресе и то време се користи за синхронизацију локалних часовника елемената EPON мреже. Вредност овог поља представља време изражено у јединицама од 14ns.

Опционо/специфично поље (енгл. *Opcode-specific field/pad*) служи за пренос додатних

Destination address (DA) (6 octets)
Source address (SA) (6 octets)
Length/type = 0x88 08 (2 octets)
Opcode (2 octets)
Timestamp (4 octets)
Opcode-specific field/pad (40 octets)
Frame check sequence (FCS) (4 octets)

Слика 2.8: Општи формат MPCP контролних порука

информација и оно се користи за имплементацију алгоритма за доделу пропусног опсега и пренос информација специфичних за MPCP како би се омогућило његово функционисање. Како постоји ограничење дужине оквира од 64 октета наметнуто од MAC контролног слоја, тако постоји и ограничење у погледу садржаја који може MPCP искористити, па се мора водити рачуна да се сви неопходни MPCP параметри размене кроз ових 40 октета.

Код за проверу исправности оквира – FCS (енгл. *Frame Check Sequence*) се користи за пренос CRC (енгл. *Cyclic Redundancy Check*) срачунате вредности на основу садржаја целог оквира која служи као референца за проверу интегритета поруке. По пријему поруке се над њеним садржајем рачуна CRC вредност и иста пореди са вредности из овог поља и уколико се не поклапају сматра се да је дошло до грешке током преноса и пакет се као такав проглашава неисправним и одбацује.

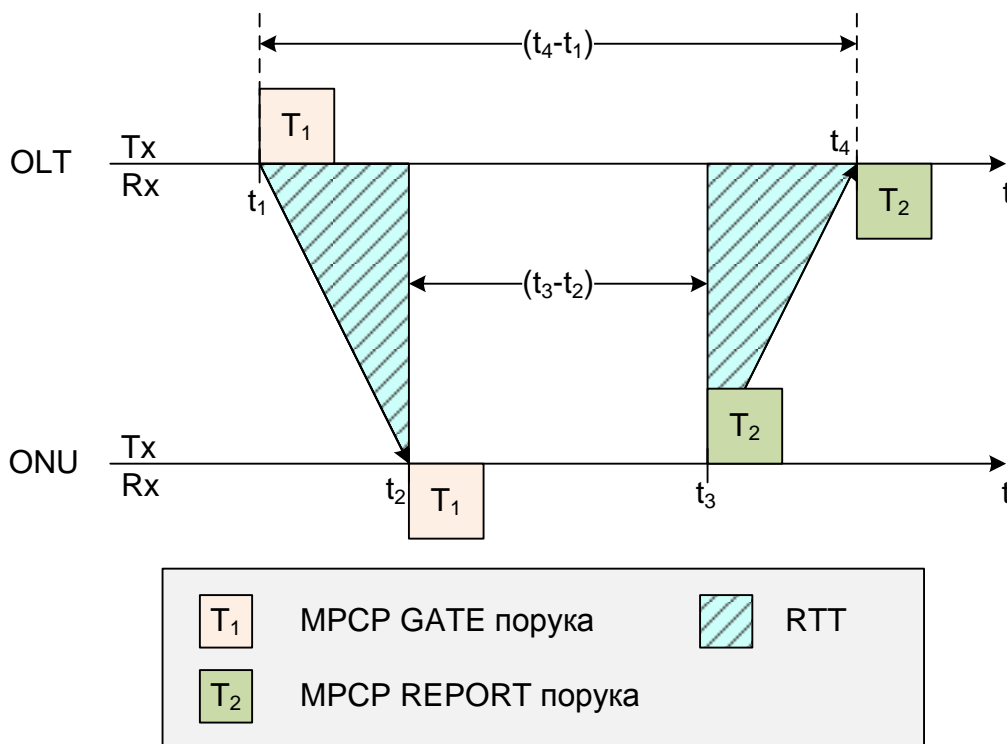
Главне функције MPCP протокола укључују обезбеђивање временске референце за синхронизацију ONU јединица, контролу процеса аутоматског откривања и додељивање пропусног опсега (временског слота) ONU јединици. Стандард [8] дефинише два MPCP начина рада: аутоматско откривање (иницијализација) и нормалан начин рада (додела пропусног опсега). Нормални режим се користи за периодично додељивање слота за пренос свим откривеним ONU јединицама. С друге стране, режим аутоматског откривања користи се за детектовање новоповезаних ONU јединица и прикупљање њихових параметара, као што су MAC адреса и повратно пропагационо кашњење – RTT (енгл. *Round-Trip Time*).

MPCP уводи пет нових MAC контролних порука: GATE и REPORT за додељивање и тражење пропусног опсега у нормалном режиму и REGISTER\_REQ, REGISTER и REGISTER\_ACK који се користе у режиму аутоматског откривања. ONU користе REPORT поруке да OLT-у пријаве статус локалних бафера. GATE контролна порука има две функције: GATE порука у нормалном режиму користи се за додељивање пропусног опсега већ откривеној ONU јединици, док се GATE порука у режиму аутоматског откривања омогућује временски слот за откривања нових, неиницијализованих ONU јединица. Процес аутоматског откривања у ONU јединици је одговоран за генерисање REGISTER\_REQ порука, обраду примљених REGISTER порука и потврђивања регистрације путем слања REGISTER\_ACK порука.

#### 2.4.1. Синхронизација EPON мреже и мерење RTT параметра

Сваки елемент у EPON мрежи у свом хардверу садржи часовник како би могао да генерише временски печат и одржава временску референцу са глобалним часовником. Глобални, односно заједнички сат, за целу EPON мрежу се налази у OLT-у. Временски печат се додаје када се поруке преносе од стране MAC контролног слоја, тј. додаје се MPCP порукама. Временски печат утиснут у MPCP поруке се генерише од локалног часовника, односно сваки елемент порукама додаје временски печат из свог часовника и зато је неопходно да часовници буду синхронизовани са глобалним. Тако и OLT приликом слања GATE порука у њих утискује временски печат из свог локалног часовника који је истовремено и глобални часовник за ту EPON мрежу. Када ONU јединица прими GATE поруку она свој локални часовник изједначава са временским печатом утиснутим у ту поруку од стране OLT-а. Ово је почетни корак у процесу синхронизације мреже, као и откривању RTT параметра за ту ONU јединицу.

Да би се избегла колизија приликом слања пакета у смеру од ONU јединица ка OLT-у потребно је да OLT познаје пропагациона кашњења ка свим елементима мреже (тј. ONU јединицама) и да кроз прорачуне о додељеним пропусним опсезима и почетку временског слота за пренос слања компензује та кашњења. Дакле, OLT шаље GATE поруку ка ONU јединици у тренутку  $t_1$  и у ту поруку утискује временски печат  $T_1$ , што је приказано на слици 2.9.



Слика 2.9: MPCP механизам за мерење RTT пропагационог кашњења у EPON мрежи

Потом ONU јединица прима GATE поруку у тренутку  $t_2$  и ресетује свој часовник тако да показује време из временског печата  $T_1$ . Када ONU јединица пошаље REPORT поруку ка OLT-у у тренутку  $t_3$  она ће у ту поруку утиснути временски печат  $T_2$ . У тренутку  $t_4$  OLT прима REPORT поруку од ONU и рачуна колико је RTT за ту ONU. Пошто је RTT збир времена потребног за пренос GATE и REPORT порука, са слике 2.9 видимо да је  $RTT = (t_2 - t_1) + (t_4 - t_3)$ . Како је време од пријема GATE поруке до слања REPORT поруке у ONU уствари  $t_3 - t_2 = T_2 - T_1$ , као и  $t_1 = T_1$  и  $t_3 = T_2$  добијамо да је  $RTT = t_2 - T_1 + t_4 - t_3 = t_4 - T_1 - T_2 + T_1 = t_4 - T_2$ . Дакле, OLT у тренутку добијања REPORT поруке рачунањем временске разлике између тренутка пријема те поруке и временског печата који је утиснут у њу добија RTT параметар за ONU јединицу која је генерисала ту поруку.

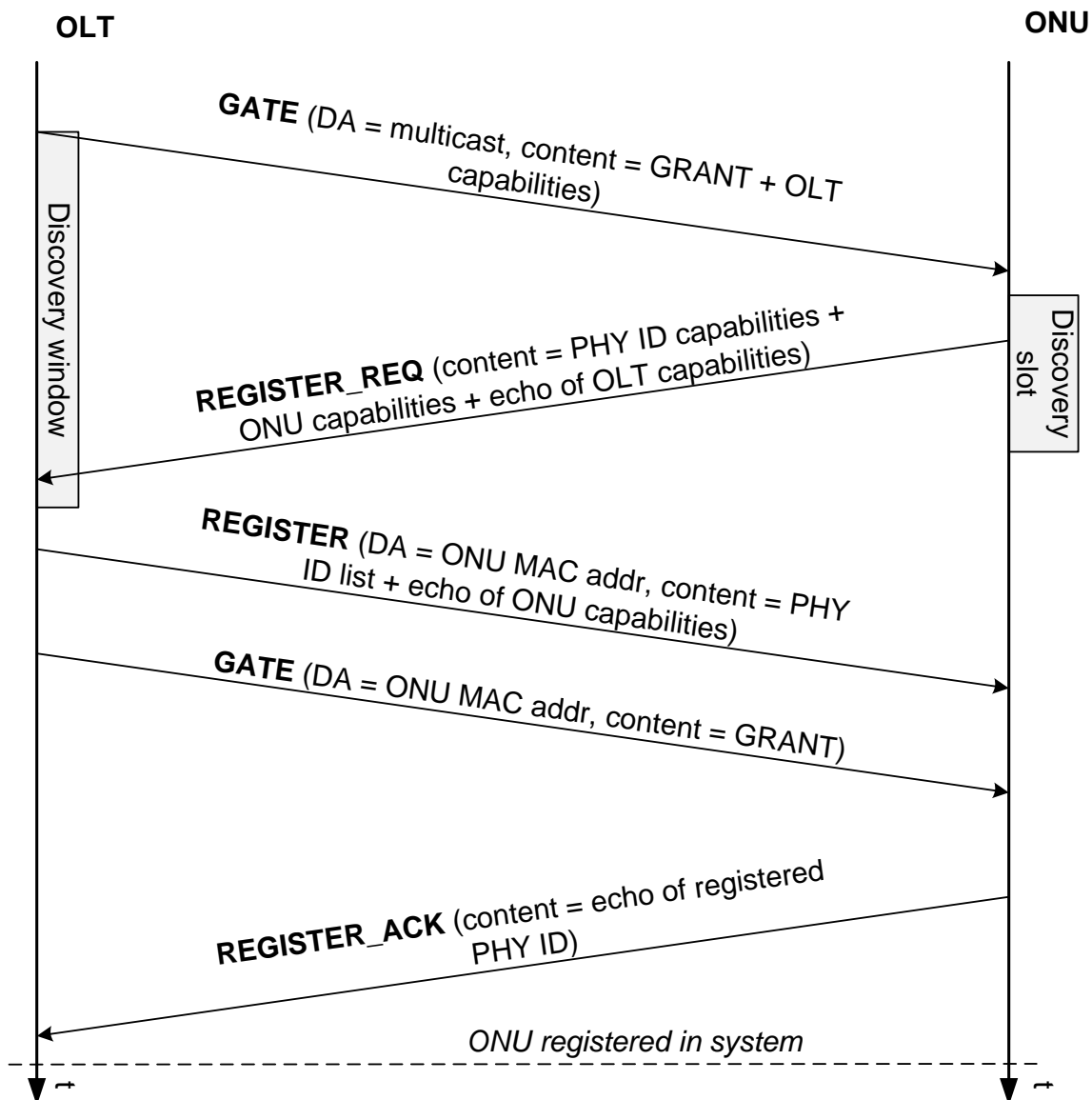
Уколико OLT жели да прими саобраћај од ONU у тренутку  $t_x$  потребно је да ONU јединици у GATE поруци пошаље да њен слот за слање почиње у тренутку  $SlotStart = t_x - RTT$ . Обавештавањем свих ONU јединица о почетку слота за слање саобраћаја израчунатог на овај начин се у ствари постиже синхронизација размене података у EPON мрежи.

#### 2.4.2. Аутоматско откривање

Да би ONU јединица разменила саобраћај са OLT-ом неопходно је да јој OLT додели пропусни опсег, тј. временски слот, за тај саобраћај. Међутим, OLT неће доделити пропусни опсег ONU јединици уколико од ње није добио REPORT поруку коју та ONU јединица може послати једино у претходно додељеном временском слоту. Дакле, неопходан је механизам за иницијалну регистрацију ONU јединица како би оне могле да се региструју као активне и без претходно послате REPORT поруке добију временски слот у којем ће даље слати захтев за доделу пропусног опсега. MPCP обезбеђује овај механизам у виду посебног мода рада и он се зове аутоматска детекција (енгл. *Auto Discovery*). Да би EPON мрежа могла да пружи сервисе свим крајњим корисницима, тј. свим активним ONU јединицама, потребно је да OLT увек зна да те јединице постоје у мрежи и да прикупи њихове параметре неопходне за размену саобраћаја са њима. OLT шаље GATE поруку посебне садржине ка свима и тако

започиње процес откривања нових ONU и њихове регистрације. Размена MPCP порука приликом процеса откривања и регистрације нових ONU јединица је приказан на слици 2.10.

OLT периодично шаље ка свим ONU јединицама GATE поруку којој за одредишну адресу уписује мултикаст (енгл. *multicast*) MAC адресу. Нове ONU јединице које требају да се региструју у EPON мрежу препознају ову поруку и одговарају на њу REGISTER\_REQUEST поруком. По пријему захтева за регистрацију од нових ONU јединица (REGISTER\_REQUEST порука) OLT тим јединицама шаље REGISTER поруку, а потом и GATE поруку у којој се ONU јединици додељује слот за пренос саобраћаја. Овај пут је у поље одредишне адресе уписана MAC адреса ONU јединице којој се порука шаље. ONU јединица добија REGISTER поруку што јој сигнализира да је регистрована у EPON мрежи и улази у нормални режим рада. Потом и прима кроз GATE поруку информацију о додељеном опсегу за пренос саобраћаја. REGISTER\_ACK поруком ONU обавештава OLT да је ушла у нормални режим рада и тиме је процес аутоматског откривања нове ONU јединице и њено регистровање у мрежу завршено. Структуре наведених порука су приказане на слици 2.11.



Слика 2.10: Размена MPCP контролних порука између OLT-а и ONU јединице током режима аутоматског откривања

Destination address (DA) (6 octets)
Source address (SA) (6 octets)
Length/type = 0x88 08 (2 octets)
Opcode = 0x00 02 (2 octets)
Timestamp (4 octets)
Number of grants/flags = 0x09 (1 octets)
Grant start time (4 octets)
Grant length (2 octets)
Sync time (2 octets)
Pad = 0x00 (31 octets)
Frame check sequence (FCS) (4 octets)

(a)

Destination address (DA) (6 octets)
Source address (SA) (6 octets)
Length/type = 0x88 08 (2 octets)
Opcode = 0x00 04 (2 octets)
Timestamp (4 octets)
Flags (1 octets)
Pending grants (1 octets)
Pad = 0x00 (38 octets)
Frame check sequence (FCS) (4 octets)

(б)

Destination address (DA) (6 octets)
Source address (SA) (6 octets)
Length/type = 0x88 08 (2 octets)
Opcode = 0x00 05 (2 octets)
Timestamp (4 octets)
Assigned port (2 octets)
Flags (1 octets)
Sync time (2 octets)
Echoed pending grants (1 octets)
Pad = 0x00 (34 octets)
Frame check sequence (FCS) (4 octets)

(в)

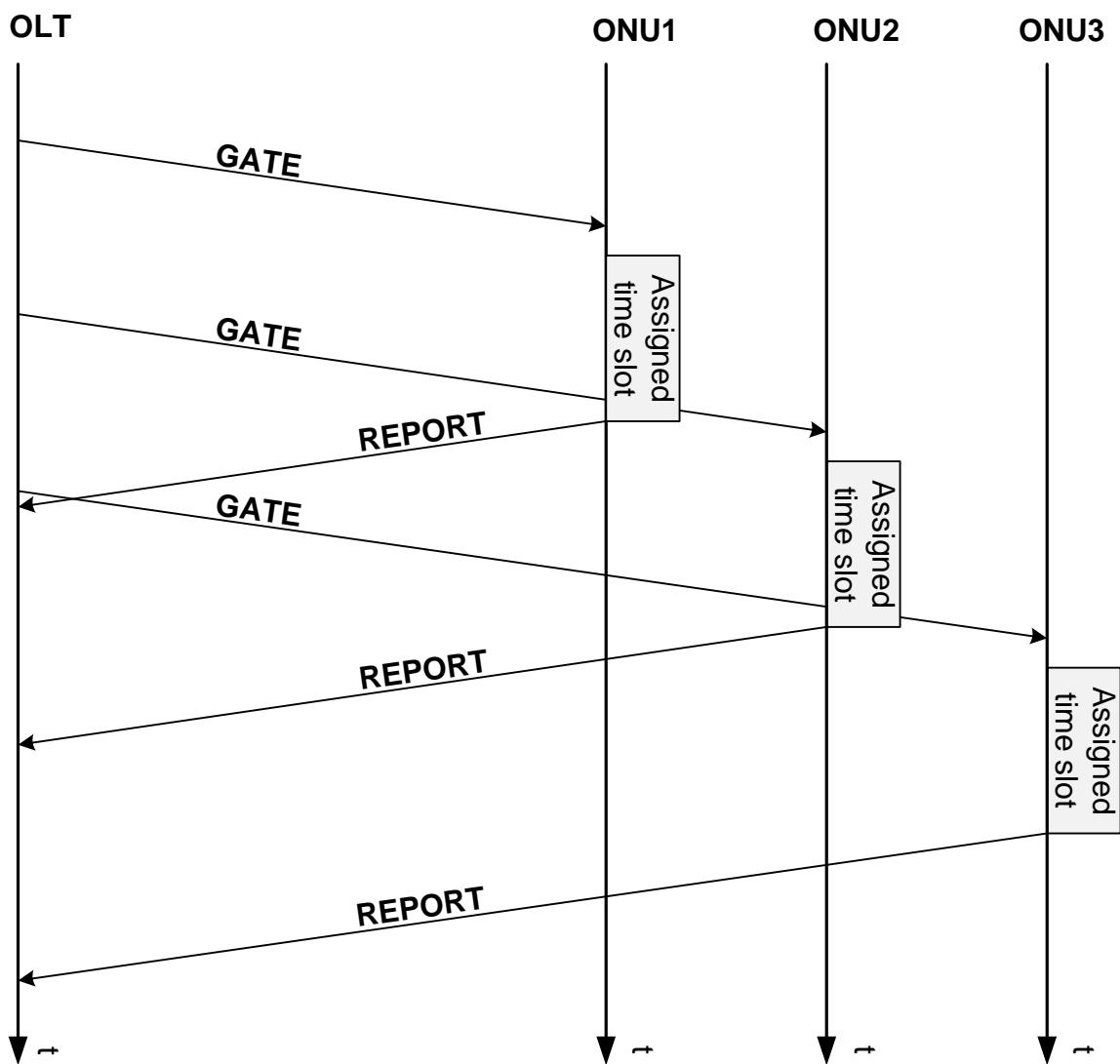
Destination address (DA) (6 octets)
Source address (SA) (6 octets)
Length/type = 0x88 08 (2 octets)
Opcode = 0x00 05 (2 octets)
Timestamp (4 octets)
Flags (1 octets)
Echoed assigned port (2 octets)
Echoed sync time (1 octets)
Pad = 0x00 (35 octets)
Frame check sequence (FCS) (4 octets)

(г)

Слика 2.11: Структуре MPCP порука које се користе у режиму аутоматског откривања - а) GATE, б) REGISTER\_REQ, в) REGISTER и г) REGISTER\_ACK

### 2.4.3. Додела пропусног опсега

У EPON мрежи се размена саобраћаја обавља двосмерно; од OLT-а ка ONU јединицама, и то се назива пренос података ка кориснику, и од ONU ка OLT-у, и то је пренос података у смеру од корисника. У смеру ка кориснику OLT је једини елемент који шаље пакете ка осталим елементима и у овом смеру преноса се сви пакети (за све ONU јединице) шаљу један за другим, а на пријему ONU јединица на основу адресе одредишта одређује да ли тај пакет послат њој и уколико јесте тај пакет прослеђује вишим слојевима док остале пакете (који су на основу одредишне адресе намењени другим ONU јединицама) одбацује. У смеру од корисника је ситуација другачија јер имамо више елемената који могу истовремено да емитују и тако узрокују колизију пакета на заједничком медијуму (оптичком влакну) у EPON мрежи. Да би се избегла колизија неопходно је да у сваком тренутку пренос података у смеру од корисника врши само једна ONU јединица. MPCP је задужен да обезбеди пренос без колизије и то постиже режимом рада где свим регистрованим ONU јединицама додељује тачно дефинисан почетак и дужину трајања временског слота у којем ће ONU емитовати кориснички саобраћај. Наравно, примењеним алгоритмом се води рачуна да се временски слотови ONU јединица одреде тако да се не преклопе и да се свакој ONU омогући пренос потребне количине саобраћаја тако да се сви пружени сервиси реализују уз гарантовани квалитет. Тај режим рада MPCP-а се назива нормални мод за алокацију пропусног опсега ONU јединицама и он се извршава континуално за разлику од мода за аутоматску детекцију који се покреће периодично. MPCP у овом режиму рада користи GATE и REPORT поруке. Шаљући GATE поруку ка ONU, OLT у њу уписује временски печат ради одржавања синхронизације EPON мреже, додељено време за почетак емитовања саобраћаја и одобрену величину слота, тј. количину података коју ONU може послати. Приликом слања REPORT поруке ка OLT-у, ONU обавештава OLT о заузетости локалних бафера и тиме га информисе колики пропусни опсег захтева за пренос баферисаног саобраћаја. Пример размене GATE и REPORT у нормалном режиму рада MPCP-а је приказан на слици 2.12. Структуре тих GATE и REPORT порука су приказане на слици 2.13.



Слика 2.12: Размена MPCP контролних порука између OLT-а и ONU јединица током нормалног мода рада

Destination address (DA) (6 octets)
Source address (SA) (6 octets)
Length/type = 0x88 08 (2 octets)
Opcode = 0x00 02 (2 octets)
Timestamp (4 octets)
Number of grants/flags (1 octets)
Grant#1 start time (4 octets)
Grant#1 length (2 octets)
Grant#2 start time (4 octets)
Grant#2 length (2 octets)
Grant#3 start time (4 octets)
Grant#3 length (2 octets)
Grant#4 start time (4 octets)
Grant#4 length (2 octets)
Pad = 0x00 (15-39 octets)
Frame check sequence (FCS) (4 octets)

(a)

Destination address (DA) (6 octets)
Source address (SA) (6 octets)
Length/type = 0x88 08 (2 octets)
Opcode = 0x00 04 (2 octets)
Timestamp (4 octets)
Number of queue sets (1 octets)
Report bitmap (1 octets)
Queue#1 report (2 octets)
Queue#2 report (2 octets)
Queue#3 report (2 octets)
Queue#4 report (2 octets)
Queue#5 report (2 octets)
Queue#6 report (2 octets)
Queue#7 report (2 octets)
Queue#8 report (2 octets)
Pad = 0x00 (0-39 octets)
Frame check sequence (FCS) (4 octets)

(б)

Слика 2.13: Структуре MPCP порука које се користе у нормалном моду рада - а) GATE и б) REPORT

## 2.5. Резиме

У овом поглављу је дат осврт на историјски развој пасивних оптичких мрежа и стандарде који их дефинишу, као и њихова подела по технологијама које се користе за пренос података и регулационим телима која прописују стандарде. Такође је дат и преглед тренутног стања у свету у погледу пасивних оптичких мрежа као и правци у којима ће се кретати развој истих у блиској будућности. Посебна пажња је посвећења EPON и WDM EPON мрежама које су тема ове докторске дисертације. Детаљно су описане карактеристике



система, приказане топологије мреже, представљени елементи и њихове функције, а потом је наведен план развоја EPON мрежа следећих генерација и начин њиховог рада и интеграције уз постојеће системе. На крају је представљен MPCP протокол помоћу којег се у EPON-у врши размена сигналних информација, синхронизација и регистрација елемената мреже и додела пропусног опсега крајњим корисницима за размену саобраћаја.

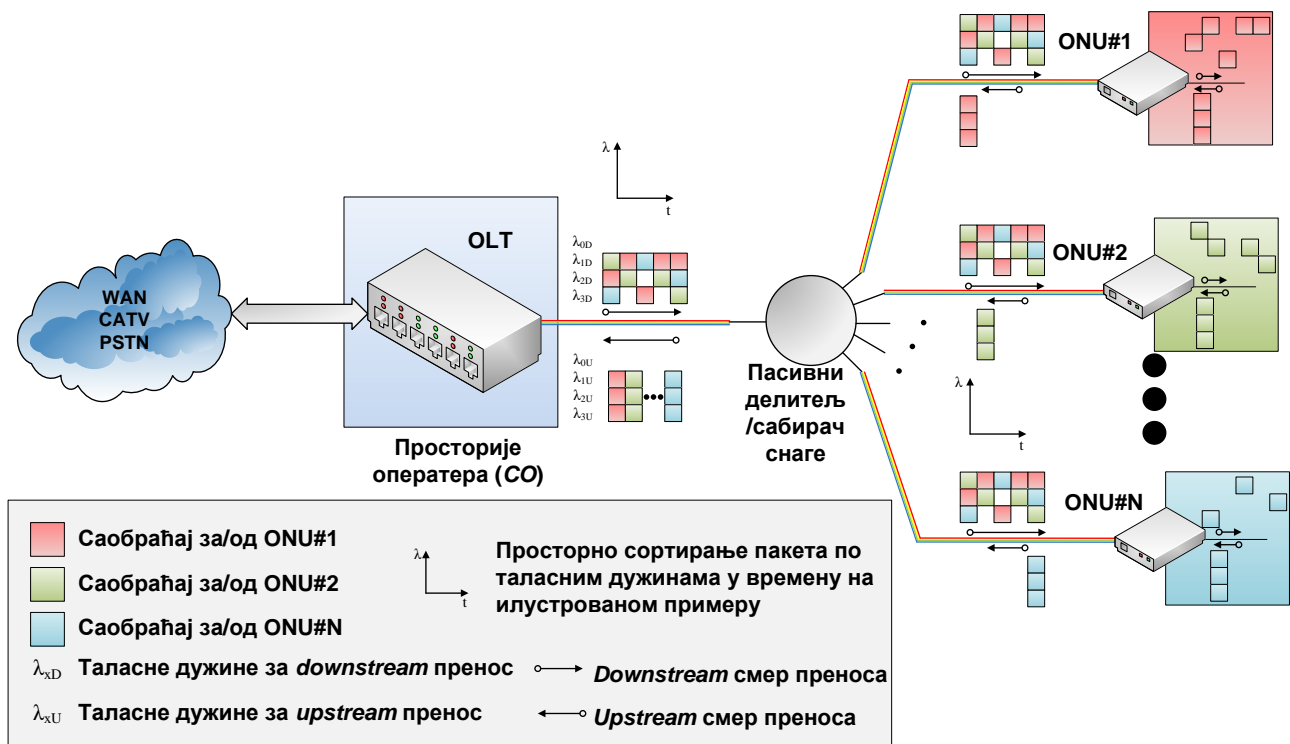
### 3. Четвороканална WDM EPON архитектура

Ради подршке имплементацији квалитета сервиса у WDM EPON мрежи аутори у [7] представљају четвороканалну оптичку приступну архитектуру. Предложена WDM EPON архитектура је EPON мрежа реализована у виду топологије „тачка-више тачака“. У односу на IEEE 802.3ah EPON разликује се у томе што се уместо једне таласне дужине за пренос података у сваком смеру користе по четири таласне дужине за сваки смер преноса. Шематски приказ организације елемената у оваквом WDM EPON је приказан на слици 3.1.

Подршка за квалитет сервиса у четвороканалном WDM EPON-у се остварује кроз подршку за диференцијалне сервисе, тј. за *Diffserv* структуру [7][18]. Имплементација квалитета сервиса се врши мапирањем таласне дужине и класе саобраћаја који ће се преко те таласне дужине и преносити. У [7] је описана подела саобраћаја према његовој природи на класе саобраћаја, и то на три следеће: EF (енгл. *Expedited Forwarding*), AF (енгл. *Assured Forwarding*) и BE (енгл. *Best Effort*) класе саобраћаја.

У EF класу саобраћаја, или другим називом у сервисе са експедитивним прослеђивањем, се класификује саобраћај са највишим приоритетом који генеришу сервиси осетљиви на кашњење и варијацију кашњења (енгл. *jitter*). Пример таквих сервиса су пренос говора, конференцијски видео позиви, и други сервиси у реалном времену (енгл. *real-time service*). Ову групу сервиса одликује равна карактеристика преноса у времену, односно природа саобраћаја одговара саобраћају са константном битском брзином - CBR (енгл. *Constant Bit Rate*).

AF класа саобраћаја, односно сервиси са загарантованим прослеђивањем, се односи на саобраћај сервиса средњег приоритета који су осетљиви на губитак пакета, али зато у односу на EF више толеришу кашњење и џитер. Пример оваквих сервиса су различите мултимедијалне платформе за пренос музике и видеа, такозвано стримовање (енгл. *streaming*) садржаја, телевизија преко интернета – IPTV (енгл. *Internet Protocol Television*) и сличне апликације. Оваквим сервисима се гарантује да ће њихови пакети бити пренети кроз мрежу, а одликује их променљива битска брзина – VBR (енгл. *Variable Bit Rate*). За ове сервисе се каже да имају *burst* природу саобраћаја, односно у кратким временским



Слика 3.1: Архитектура четвороканалног WDM EPON система представљеног у [7]

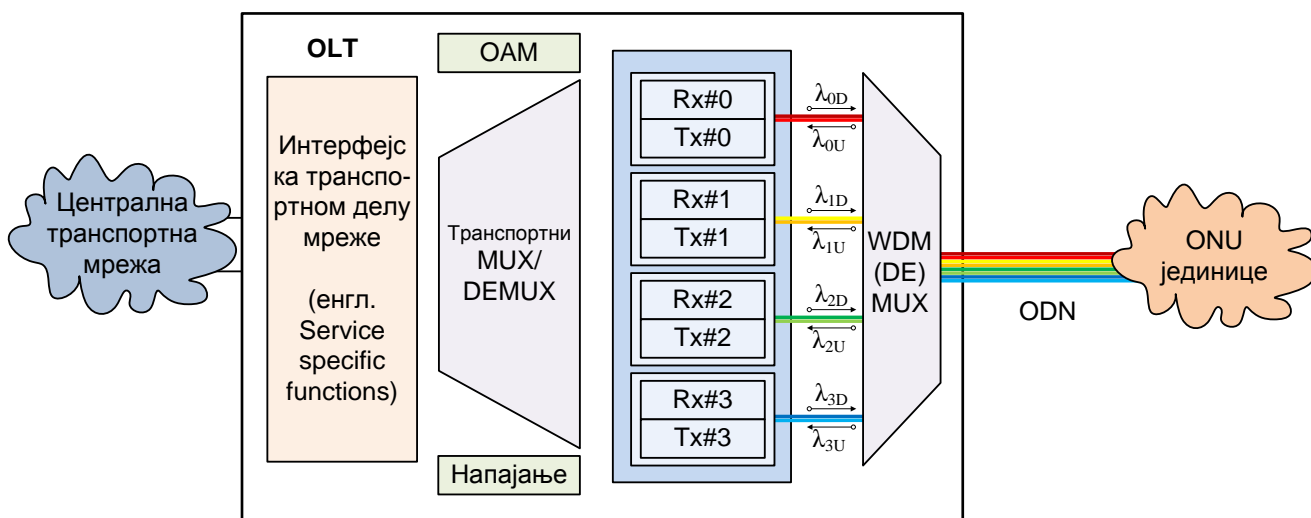
интервалима се саобраћаја преноси изузетно великим интензитетом док је између два таква преноса интензитет веома низак. Другим речима саобраћај као да се генерише и преноси у налетима.

У трећу класу саобраћаја, BE класу, се сврставају сервиси чији саобраћај приликом преноса има најнижи приоритет. Сервиси ове класу нису осетљиви ни на кашњење, ни на цитер, а у случају погрешно примљених пакета врши се њихова ретрансмисија све док се исправно не пренесу. Такви сервиси су нпр. пренос датотека, пренос електронске поште (енгл. *e-mail*), апликације за обраду текста и графике на мрежи, тј. у облаку (енгл. *cloud*). У литератури се ова класа саобраћаја назива и DF класа (енгл. *Default Forwarding*).

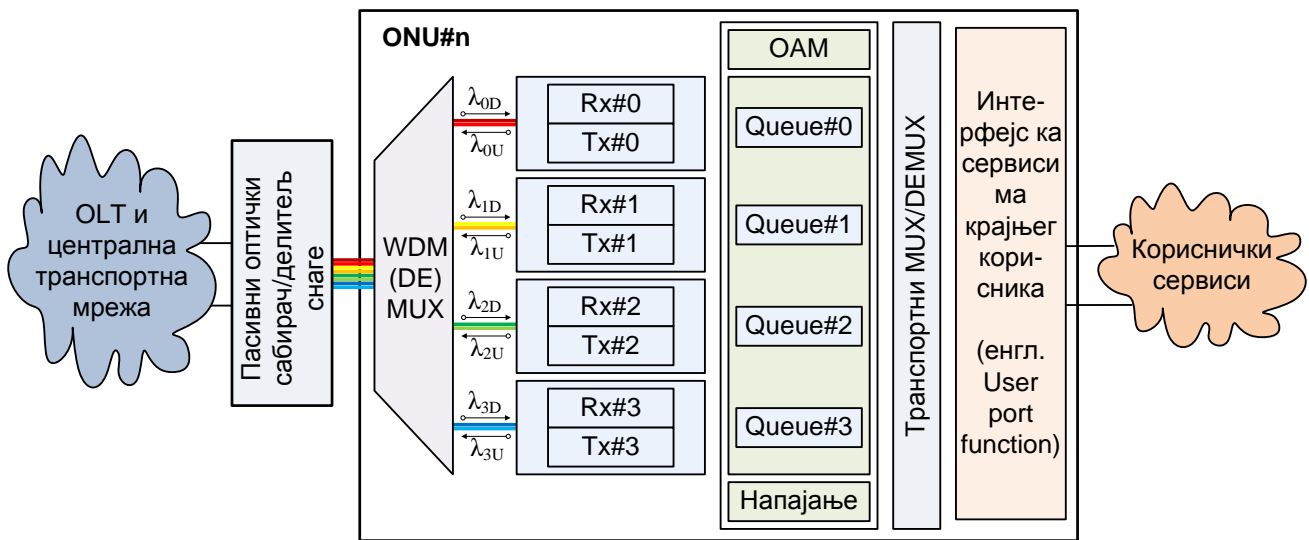
Дакле, у четвороканалном WDM EPON-у се три таласне дужине  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$  резервишу за пренос саобраћаја који припадају различитим класама саобраћаја како би се у потпуности искористиле перформансе система и реализовала подршка за имплементацију квалитета сервиса. Аутори у [7] представљају и детаљно образлажу два различита принципа мапирања између класа саобраћаја и таласних дужина које се користе за њихов пренос. За интеграцију ONU јединица постојећих једноканалних EPON система се резервише четврта таласна дужина  $\lambda_0$ , која је истовремено и оригинална, тј. стандардом дефинисана, таласна дужина која се користи у тим EPON системима. Такође, таласна дужина  $\lambda_0$  може да се користи и за пренос контролних порука, регистрацију и синхронизацију свих ONU јединица у систему, и оних старије генерације и оних које подржавају вишеканални пренос. Иако се за мапирање одређене класе саобраћаја користи ознака  $\lambda_n$ , где је  $n = 0, 1, 2$  или  $3$ , та ознака заправо представља уређени пар од две таласне дужине, по једне за пренос саобраћаја у сваком смеру. У представљеном четвороканалном WDM EPON систему се користе по четири таласне дужине за пренос података у сваком смеру, и у фреквенцијском домену се таласна дужина  $\lambda_n$  за пренос ка кориснику разликује од таласне дужине  $\lambda_n$  коришћене за пренос од корисника, али преко обе се преноси иста класа саобраћаја. Другим речима,  $\lambda_0$ ,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$  заправо представљају један пар таласних дужина које се користе за пренос саобраћаја исте класе саобраћаја у четвороканалном EPON WDM систему.

WDM EPON систем предложен у [7] је приказан на слици 3.1 и као што се на истој види и OLT и ONU јединице подржавају пренос преко све четири таласне дужине. На сликама 3.2 и 3.3 [7] су приказане логичке архитектуре OLT и ONU јединица. Као што је приказано, OLT је опремљен са четири фиксна предајника за симултани пренос саобраћаја у смеру ка кориснику, тј. ка ONU јединицама, као и са четири фиксна оптичка пријемника за пријем саобраћаја који константно стиже у OLT од ONU јединица (у смеру преноса од корисника) у унапред одређеним временским слотовима. Такође и логичка архитектура ONU јединица подразумева постојање четири фиксна оптичка примопредајника за размену саобраћаја са OLT-ом. Како је ONU јединицама због могућег истовременог приступа дељеном медијуму (оптичком влакну) од стране OLT-а одређен временски прозор у којем смеју слати а да притом не дође до колизије, неопходне је генерисани саобраћај од стране корисника складиштити (баферисати) до момента слања ка OLT-у. У ту сврху су у логичкој архитектури ONU јединица представљени бафери који служе управо баферисању саобраћаја разврстаног по класама. Између сваке таласне дужине у систему и класе саобраћаја постоји фиксна веза, па се тако  $\lambda_1$  користи за пренос EF класе саобраћаја,  $\lambda_2$  за саобраћај AF класе,  $\lambda_3$  за BE класу, а за синхронизацију и сигнализацију, као и за компатибилност и интеграцију ONU јединица класичног система, се користи  $\lambda_0$ . Практично, четири бафера, или простије речено меморије, у ONU јединици баферишу саобраћај за сваку таласну дужину посебно. Тако ће се пакети из Бафера#1 са слике 3.3 до OLT-а пренети коришћењем таласне дужине  $\lambda_1$ , пакети из Бафера#2 преко  $\lambda_2$ , и тако даље. На овај начин се у ONU јединицама већ приликом уписа пакета крајњег корисника у одређени бафер врши класификација саобраћаја, повезује бафер са датим примопредајником и избегава мешање пакета различитих класа у меморији што елиминира евентуално додатно кашњење пакета које може бити узроковано чекањем да се пакети једне класе саобраћаја из бафера доставе примопредајнику на располагање тек када се из истог бафера пренесу пакети друге класе који су у тај бафер пристигли раније. Овако се успоставља паралелан рад четири виртуелне EPON мреже које раде на четири различите таласне дужине преко исте пасивне оптичке инфраструктуре, тј. ODN-а.

Начин преноса података у смеру ка кориснику у временском и фреквенцијском домену, тј. алокација пропусног опсега, у четвороканалном WDM EPON-у је непромењен у односу на класични EPON, што значи да OLT јединица коришћењем емисионог (енгл. *broadcast*) механизма прослеђује саобраћај пристигао из централне транспортне мреже, или скраћено CN (енгл. *Core Network*), ка корисницима без задршке. Наравно, у зависности од класификације тих пристиглих пакета у OLT из транспортног дела мреже они се шаљу коришћењем примопредајника који ради на тој класи додељеној таласној дужини. Тако добијамо истовремени емисиони пренос пакета ка свим ONU јединицама на више таласних



Слика 3.2: Архитектура OLT-а у четвороканалном WDM EPON систему предложеном у [7]



Слика 3.3: Архитектура ONU јединица у четвороканалном WDM EPON систему предложеном у [7]

дужина, а свака ONU јединица на основу података у заглављу оквира распознаје да ли је тај пакет намењен баш њој и само у том случају се ти пакети даље обрађују док се остали одбацују. Пренос података у смеру од корисника, од ONU јединица ка OLT-у, мора да се организује за сваку таласну дужину посебно како би се избегла могућа колизија. И у класичном EPON и овде у четвороканалном WDM EPON систему се примењује TDM приступ, с тим што сада постоји додатна димензија – таласне дужине. Неопходно је DBA алгоритмом у OLT-у извршити доделу пропусног опсега за сваког корисника и то по свакој таласној дужини, а да се притом обезбеди имплементација квалитета сервиса. У ту сврху аутори у [7] представљају две шеме за алокацију пропусног опсега свих таласних дужина у систему – FWPBA (енгл. *Fixed Wavelength Priority Bandwidth Allocation*) модел и DWPBA (енгл. *Dynamic Wavelength Priority Bandwidth Allocation*) модел, чији ће механизми рада у наставку бити описани. У предложеним моделима за комуникацију и синхронизацију елемената мреже се користи проширени MPCP протокол, који је већ раније описан у својој основној варијанти, док су проширења предложена у [7] дата у наставку.

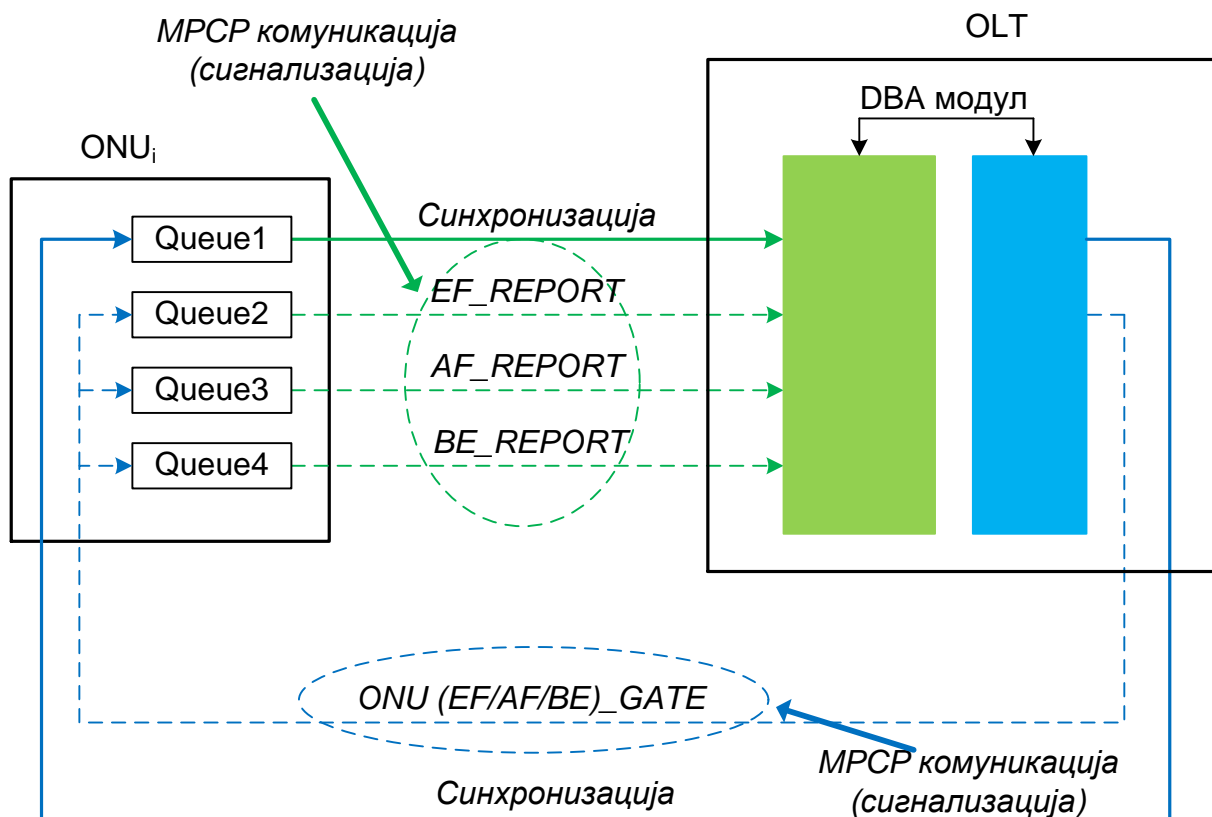
### 3.1. FWPBA модел

Приликом размене саобраћаја у четвороканалној WDM EPON мрежи користи се фиксно мапирање између класе саобраћаја и таласне дужине која ће се користити за пренос пакета те класе саобраћаја. Тај принцип је примењен у FWPBA моделу па тако имамо да је таласна дужина  $\lambda_1$  резервисана искључиво за пренос етернет пакета EF класе саобраћаја,  $\lambda_2$  исто тако за пакете AF класе саобраћаја, док је таласна дужина  $\lambda_3$  резервисана за BE класу саобраћаја. Као што је раније наведено четврта таласна дужина  $\lambda_0$  се користи за пренос контролних порука, синхронизацију и регистрацију ONU јединица, као и за рад класичних EPON ONU јединица које не подржавају четвороканалну WDM EPON архитектуру [7]. Због фиксне везе која је направљена између типа саобраћаја и таласне дужине по којој се тај саобраћај преноси, а која је позната OLT-у, алгоритам за алокација таласне дужине у овом моделу није потребан чиме је сам модел једноставнији и ефикаснији. Такође се у систему користе и примопредајници који раде на фиксним таласним дужинама па се тиме смањују комплексност и цена опреме.

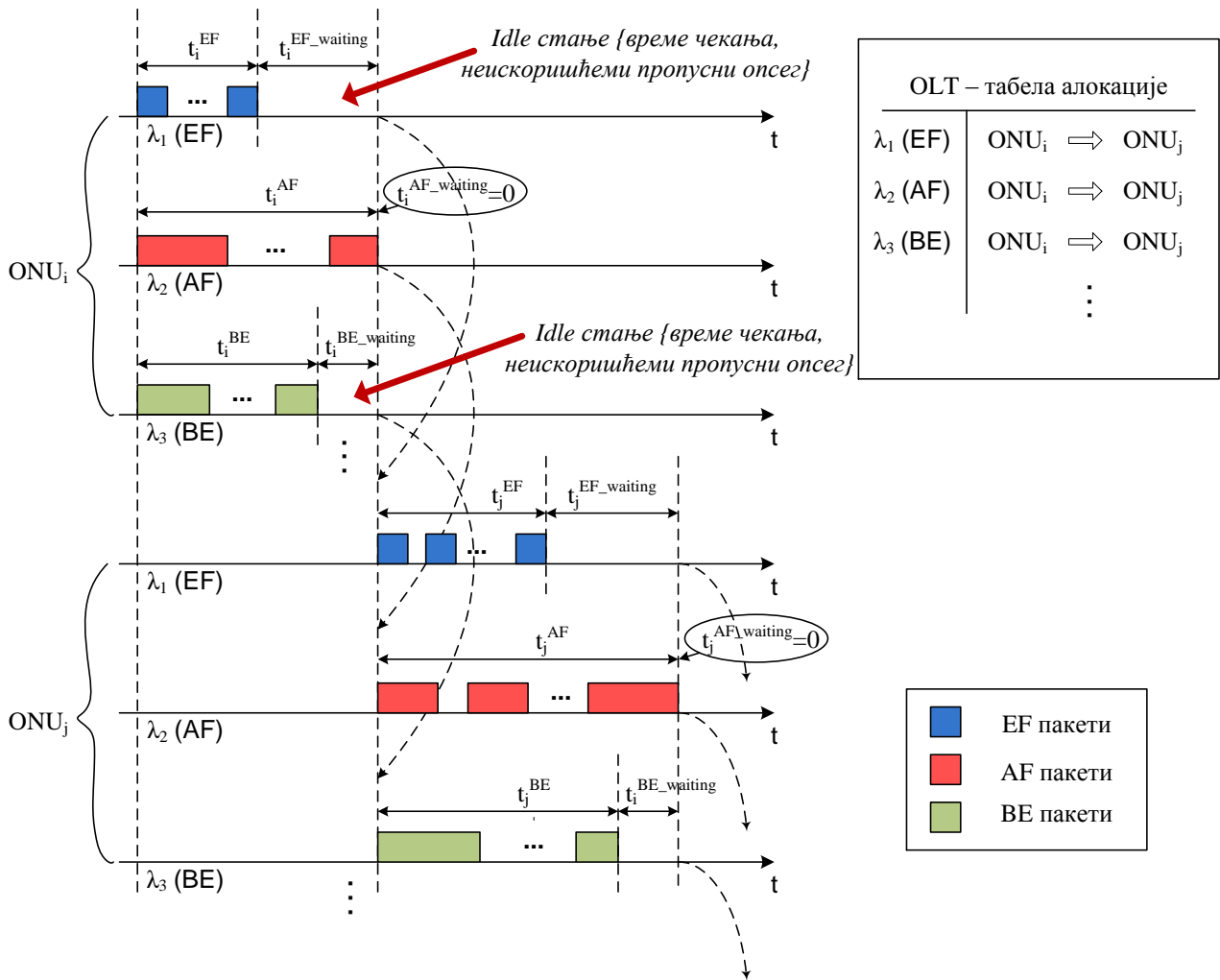
Што се тиче алокације пропусног опсега ONU јединица ту је алгоритам следећи. По завршетку слања саобраћаја свака ONU јединица генерисањем MPCP REPORT контролне поруке шаље захтев OLT-у за алоцирање одређене количине пропусног опсега, и то по свакој

таласној дужини независно. FWPBA модел чека док не пристигну REPORT поруке од свих регистрованих ONU јединица у систему, тј. користи *offline* распоређивање за алокацију ресурса. Тек када OLT прими све REPORT поруке покреће се DBA модул који на основу примљених захтева за пропусним опсегом рачуна колики пропусни опсег ће се доделити свакој од ONU јединица. Алгоритам за доделу пропусног опсега функционише тако што током сваког циклуса преноса (који траје док све ONU јединице не размене саобраћај са OLT-ом) једна ONU јединица врши слање пакета ка OLT-у на све три таласне дужине истовремено и не ослобађа их за следећу ONU јединицу у систему све док се на свакој од њих не заврши слање пакета одговарајуће класе саобраћаја у оквиру додељеног пропусног опсега. Тек када ONU јединица заврши са слањем саобраћаја на све три таласне дужине она ослобађа те три таласне дужине и OLT их додељује следећој ONU јединици за пренос њеног саобраћаја. DBA модул у OLT-у дакле додељује исти пропусни опсег ONU јединици за све три класе саобраћаја и то на основу захтева најоптерећеније класе, тј. максималног захтеваног пропусног опсега за тај циклус преноса. Предност оваквог додељивања пропусног опсега је генерисање и слање само једне MPCP GATE у OLT-у за сваку ONU јединицу, а самим тим и брже процесирање у OLT-у која је растерећенија током рачунања додељених пропусних опсега. На слици 3.4 је дат логички приказ размене управљачких порука из [7] којима се од стране ONU јединице захтева пропусни опсег а од стране OLT-а исти додељује.

У [7] је у виду слике такође дат изглед табеле редоследа коришћења таласних дужина за пренос саобраћаја, односно коришћење алоцираног пропусног опсега, као и временски дијаграм преноса саобраћаја по класама у смеру од ONU јединица ка OLT-у. Тај временски дијаграм и табела су приказани на слици 3.5.



Слика 3.4: Размена контролних MPCP порука у FWPBA моделу WDM EPON система [7]



Слика 3.5: Размена саобраћаја и начин доделе таласних дужина у FWPBA моделу WDM EPON система [7]

На слици 3.5 се види да се у истом тренутку ONU јединици додељују за пренос све три таласне дужине у систему, али их она ослобађа тек када се на најоптерећенијој заврши пренос пакета класе саобраћаја коју та таласна дужина преноси (на слици је то  $\lambda_2$  која служи за пренос AF класе саобраћаја). У складу са тренутним развојем и имплементацијом сервиса сматра се да је AF класа саобраћаја данас најзаступљенија у приступним мрежама. Са претходне слике се види да таласне дужине  $\lambda_1$  и  $\lambda_3$  које преносе EF и BE класу саобраћаја, чији сервиси генеришу мању количину пакета, морају да чекају одређено време док се по  $\lambda_2$  не заврши слање пакета да би се доделиле следећој ONU јединици. То чекање, када нема преноса саобраћаја по таласним дужинама, представља неискоришћени пропусни опсег.

У смеру преноса од OLT-а ка ONU јединицама нема алокације пропусног опсега за сваку ONU понаособ јер се, као што је већ раније наведено, пакети по пристизању у OLT емисионо прослеђују ка свим ONU јединицама као у класичном 802.3ah EPON систему.

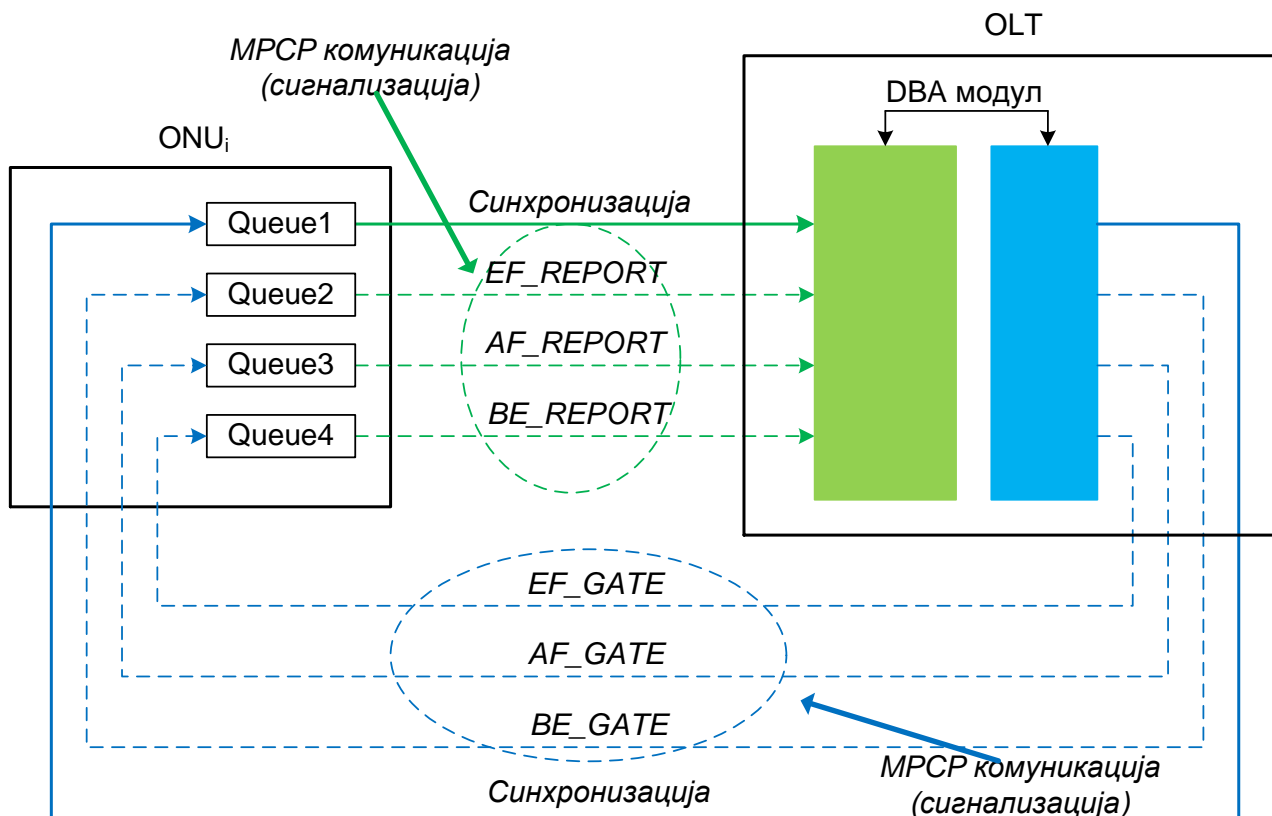
Количина неискоришћеног пропусног опсега у FWPBA моделу, времена чекања таласних дужина класа саобраћаја које су слабије оптерећење, као и математички модел алгоритма за алокацију пропусног опсега су аутори представили и детаљно описали у [7]. Овај модел уз неопходне промене у архитектури елемената и начину преноса података ће бити почетни модел за имплементацију механизма за уштеду енергије и добијања енергетски ефикасне WDM EPON мреже.

## 3.2. DWPBA модел

У DWPBA моделу четвороканалне WDM EPON мреже је, као и у FWPBA моделу, мапирање између таласне дужине и класе саобраћаја фиксно уз коришћење *offline* распоређивања за алокацију пропусног опсега у DBA модулу у OLT-у. У Овом моделу, за разлику од FWPBA модела, ONU јединице не задржавају таласне дужине на којима нема преноса саобраћаја предефинисане класе већ их аутоматски ослобађају независно од тога да ли друге таласне дужине преносе саобраћај своје класе или не. Када ONU јединица ослободи таласну дужину OLT исту ту таласну дужину алоцира за пренос исте класе саобраћаја али у оквиру следеће ONU јединице која је раније одређена у DBA модулу на основу примљених REPORT порука и захтеваних пропусних опсега ONU јединица. Сада је неопходно процесирање захтеваних капацитета за сваку класу саобраћаја независно и обавештавање ONU јединица о додељеном пропусном опсегу који сада није јединствен за све три класе саобраћаја, већ баш насупрот томе – за сваку класу саобраћаја се додељује посебан пропусни опсег на припадајућој таласној дужини. Због тога је DBA алгоритам комплекснији јер се у OLT-у практично процесирају и контролишу три независне EPON мреже, свака ради по једној таласној дужини. Због тога је и сигнализациона комуникација између OLT-а и ONU јединица овде интензивнија, јер се уместо једне MPCP GATE поруке сада шаљу три, што је приказано на слици 3.6.

Пренос саобраћаја у DWPBA моделу у смеру ка кориснику, од OLT-а ка ONU јединицама, остаје непромењен у односу на претходни модел – OLT користећи емисиони механизам прослеђује пристигле етернет пакете ка свим ONU јединицама користећи предефинисану таласну дужину према класи саобраћаја пакета који се шаље.

У смеру од корисника је пренос података нешто другачију него раније. Додела таласних дужина ONU јединицама у времену (а у оквиру једног циклуса преноса) је потпуно

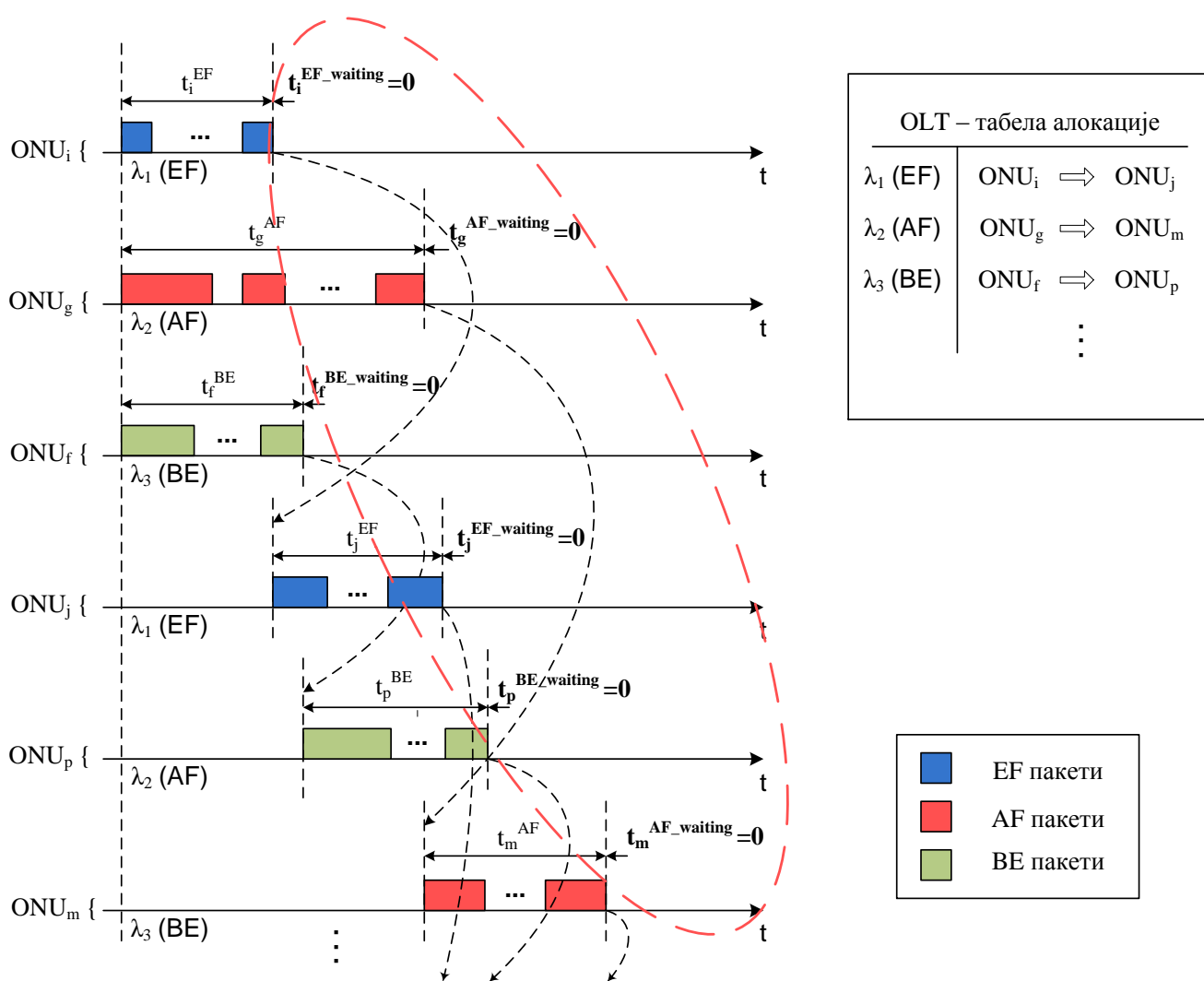


Слика 3.6: Размена контролних MPCP порука у DWPBA моделу WDM EPON система [7]



асинхрона. Тако имамо да су у једном тренутку три таласне дужине додељене различитим ONU јединицама, што су аутори [7] приказали на слици 3.7.

У посматраном почетном тренутку на слици 3.7 имамо да је  $ONU_i$  јединици додељена  $\lambda_1$  за пренос пакета EF класе саобраћаја,  $ONU_g$  јединици  $\lambda_2$  за пренос EF класе и  $ONU_f$  јединици  $\lambda_3$  за пренос BE класе. Видимо да  $ONU_i$  када заврши са преносом EF саобраћаја по таласној дужини  $\lambda_1$  она истог тренутка ослобађа  $\lambda_1$  и ова таласна дужина се додељује следећој  $ONU_j$  јединици за преноса саобраћаја исте класе. Истовремено се на таласним дужинама  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$  даље независно врши слање пакета AF и BE класа саобраћаја у  $ONU_g$  и  $ONU_j$  јединицама, респективно. Компонента чекања таласне дужине када заврши са преносом је сада елиминисана, јер се свака таласна дужина независно процесира и као резултат тога имамо моментално додељивање исте следећој ONU јединици на располагање када се заврши са преносом саобраћаја. Због овог независног процесирања таласних дужина имамо да OLT додатно мора да води рачуна о додељивању таласних дужина, тј. пропусног опсега на њима, за сваку ONU јединицу тако да свака од њих добије прилику за пренос сваке класе саобраћаја у једном циклусу преноса. Пренос саобраћаја по таласним дужинама више



Слика 3.7: Размена саобраћаја и начин доделе таласних дужина у DWPBA моделу WDM EPON система [7]

није синхронизован и оне се не алоцирају тако да се истовремено користе у једној ONU јединици за разлику од алоцирања у претходном моделу.

Као што је и очекивано код DWPBA модела је динамичка алокација пропусног опсега сложенија. Међутим, и поред тога се у DWPBA моделу може појавити неефикасност у искоришћености пропусног опсега. То је последица правила да се свака таласна дужина може користити за пренос само једне унапред дефинисане класе саобраћаја. Када је једна класа саобраћаја мање заступљена, због анализе у пример узмимо да је то EF класа саобраћаја која преноси говорне сервисе, на таласној дужини која је одређена за пренос те класе, тј.  $\lambda_1$ , се може десити да се пре истека циклуса преноса сав саобраћај те класе пренесе и да један део циклуса преноса  $\lambda_1$  не преноси пакете. Због распрострањености мултимедијалних сервиса који се сврставају у AF класу саобраћаја, као и могућности преноса велике количине неприоритетног саобраћаја у одређеним тренуцима, тј. коришћење сервиса који генеришу саобраћај BE класе као што су *online backup*, FTP пренос или снимање у *cloud* простор, овакав сценарио је веома могућ и тада имамо да је једна таласна дужина знатно мање оптерећена и њен пропусни опсег неискоришћен. Поред тога, ако би корисници од сервиса BE класе саобраћаја углавном користили *e-mail* апликације и *web* претраживање, који нису захтевни у погледу пропусног опсега, десило би се да и  $\lambda_3$  има знатно мању количину саобраћаја за пренос у односу на  $\lambda_2$ . Онда би у систему имали две таласне дужине које су значајно мање оптерећене у односу на трећу и самим тим на њима имамо већу количину неискоришћеног пропусног опсега. Као решење за тај неискоришћени пропусни опсег аутори у [7] најављују будући развој унапређеног DWPBA модела, односно DWPBA-FS (енгл. *Dynamic Wavelength Priority Bandwidth Allocation with Fine Scheduling*) модел. Као и код претходно описана два модела, FWPBA и DWPBA, и овде се користе исте архитектуре OLT-а и ONU јединице приказане на сликама 3.2 и 3.3 које користе по четири фиксна примопредајника. Разлика у односу на претходне моделе је коришћење све четири таласне дужине за пренос саобраћаја. Таласна дужина  $\lambda_0$  се не користи више само за пренос контролних порука и саобраћаја система старијих генерација већ и за пренос саобраћаја одређених класа саобраћаја. Контролне MPCP поруке се у овом моделу преносе као и кориснички саобраћај преко све четири таласне дужине у мрежи. У DWPBA-FS је новина и класификација саобраћаја пошто је AF класа саобраћаја, као најзаступљенија у приступним мрежама, подељена на четири подкласе саобраћаја и то AF1, AF2, AF3 и AF4, а све у складу са *Diffserv* структуром [18]. С овом поделом сада имамо у систему шест класа саобраћаја и четири таласне дужине за њихов пренос, па се у ONU јединицама примењује WFQ (енгл. *Weighted Fair Queuing*) алгоритам за сортирање пакета по баферима ради уједначавања протока чиме се минимизира кашњења пакета и побољшавају перформансе система [7]. Такође се у [7] описује и сегрегација различитих класа и подкласа саобраћаја и њихов пренос преко таласних дужина, које сада могу преносити једну или више класа и подкласа саобраћаја. DWPBA-FS модел представљен у [7] је потпуно у складу са IEEE 802.3ah стандардом, а за подршку и имплементацију квалитета сервиса се користи DBA алгоритам са *offline* начином распоређивања за алокацију ресурса ONU јединица.

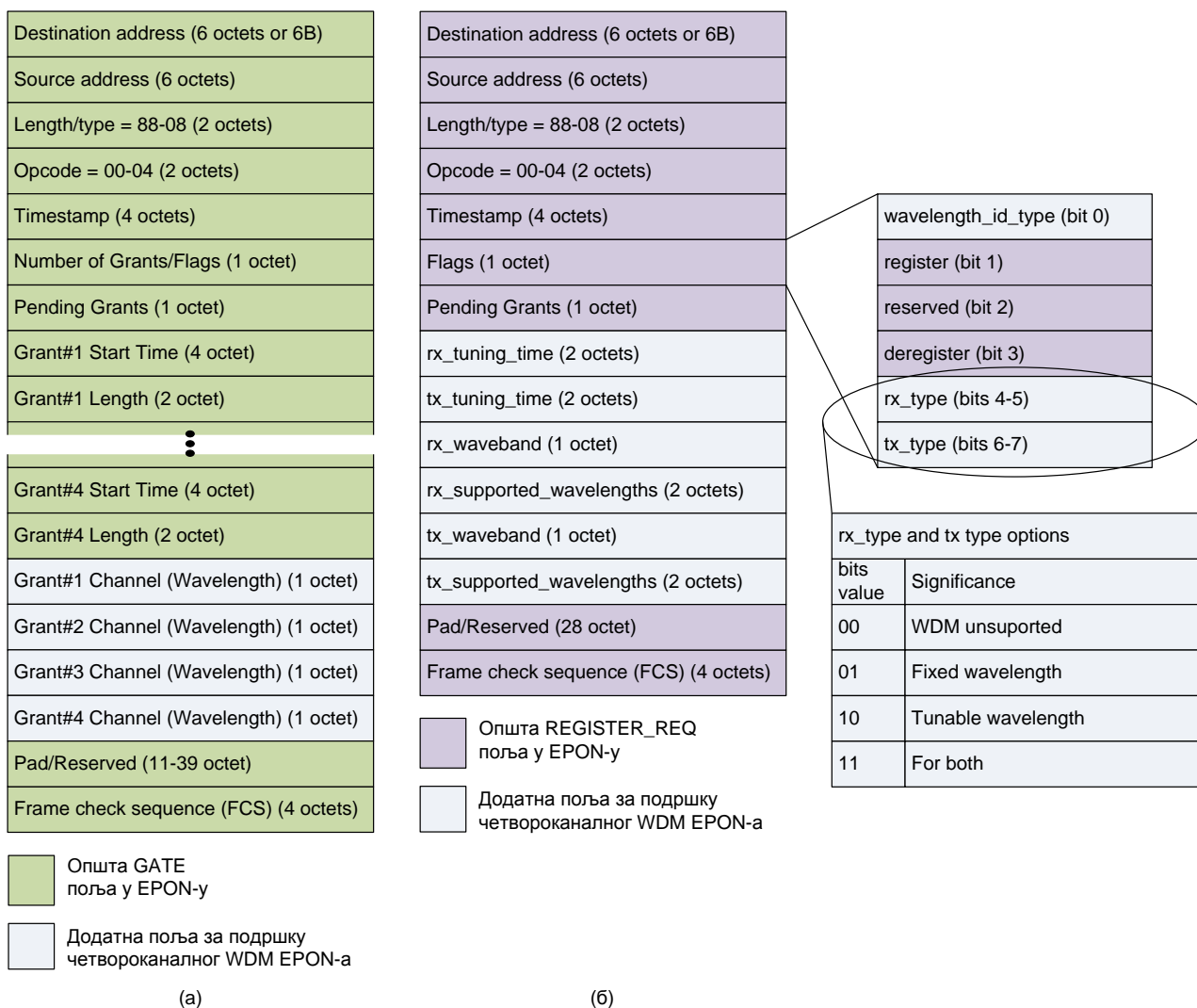
DWPBA модел ће у овој дисертацији бити коришћен за унапређење начина преноса података како би се обезбедили предуслови за имплементацију механизма за уштеду енергије, тј. како би се добила енергетски ефикасна четвороканална WDM EPON мрежа. Ради даљих побољшања перформанси тог система и параметара квалитета сервиса поред *offline* распоређивања у DBA модулу примениће се и *online* распоређивање.

За DWPBA модел је у [7] представљен и дат математички модел по којем ради алгоритам за алокацију пропусног опсега. Такође су и приказ перформанси, симулације DWPBA модела мреже као и упоредна анализа са FWPBA моделом аутори дали у [7].

### 3.3. Проширење MPCP протокола за подршку четвороканалне WDM EPON архитектуре

Мод рада Аутоматско откривање MPCP протокола осим откривања и регистрације активираних ONU јединица има и функцију размене параметара неопходних за прописан рад новорегистрованих елемената у мрежи. Током регистрације ONU јединице у четвороканалну WDM EPON [7] потребно је поред раније наведених параметара пренети и информације везане за подршку WDM технологије. Да би у OLT-у алгоритми за алокацију таласних дужина и пропусног опсега могли да се извршавају неопходно им је доставити податке о типу оптичког примопредајника који користи ONU јединица, да ли се користе тјунабилни ласери и колико им је време подешавања таласне дужине, као и листа подржаних таласних дужина у предајнику и пријемнику [7]. Неопходно је да OLT WDM EPON-а поседује ове информације за сваку ONU јединицу, јер наведене информацију у потпуности дефинишу WDM архитектуру ONU јединице [7], а самим тим и EPON мреже. У сврху размене ових информација неопходно је проширити MPCP протокол, тј. допунити процес откривања и регистрације увођењем нових поља у GATE и REGISTER\_REQ поруке. У [7] је наведено да је потребно увести поља *transmitter\_type* (величине 2 бита), *transmitter\_tuning\_time* (величине 16 бита), *transmitter\_supported\_wavelengths* (варијабилне величине), *receiver\_type* (величине 2 бита), *receiver\_tuning\_time* (величине 16 бита) и *receiver\_supported\_wavelengths* (варијабилне величине). Наведена поља се додају REGISTER\_REQ порукама како би ONU јединице приликом регистрације обавестиле OLT о својим WDM могућностима. Након обраде добијених информација у OLT-у алгоритми за алокацију таласних дужина одређују на којим таласним дужина ће се одвијати размена саобраћаја између OLT-а и сваке ONU јединице. Аутори у [7] предлажу додавање *Wavelength\_field* поља у GATE поруку коју OLT шаље ONU јединицама ради обавештавања ONU о алоцираној таласној дужини за пренос саобраћаја. Предложена проширења REGISTER\_REQ и GATE порука су дата на слици 3.8 где је приказана структура тих проширених MPCP порука.

Подршком процеса регистрације за нове вишеканалне PON мреже се баве и аутори [19]. Традиционални протокол за регистрацију је дизајниран за једноканалне ONU јединице, па аутори у [19] наводе да није погодан за регистрацију вишеканалних ONU јединица, јер не може да гарантује повезаност свих канала, тј. таласних дужина. Стога је неопходно проширити традиционални протокол за регистрацију или дизајнирати нови за примену на вишеканалне ONU јединице у NG-EPON мрежама. Аутори прво представљају проширење традиционалног протокола за регистрацију за подршку вишеканалних ONU јединица. Након тога предлажу нови протокол за регистрацију вишеканалних ONU јединица. У [19] се моделира и симулира процес регистрација за оба протокола, а анализирани перформансе се огледају у времену потребном за регистрацију ONU јединице. Резултати симулације показују да предложени нови протокол постиже извесна побољшања у погледу кашњења регистрације. Оно што је интересантно у [19] је да се проширењем постојећег MPCP протокола може остварити потпуна подршка за регистрацију нових ONU јединица и њихов рад по више таласних дужина у NG-EPON мрежама.



Слика 3.8: Проширења структура контролних MPCP порука ради подршке четвороканалном WDM EPON систему – а) проширење GATE поруке и б) проширење REGISTER\_REQ поруке

### 3.4. Резиме

У [7] је представљена и детаљно описана четвороканална WDM EPON архитектура која у односу на друге представљене WDM EPON системе предлаже додељивање таласне дужине класи сервиса а не ONU јединици. На тај начин се ефикасно имплементира QoS подршка уз коришћење свега четири таласне дужине за пренос саобраћаја у систему. Управо та четвороканална оптичка приступна мрежа је основ за имплементацију механизма за уштеду енергије чијом применом се добија енергетски ефикасна оптичка приступна мрежа, која је и тема ове докторске дисертације. Ова глава најпре представља четвороканалну WDM EPON архитектуру наводећи начин алокације таласних дужина за класе саобраћаја, приказујући топологију ове приступне мреже и архитектуру њених делова. Потом се даје преглед FWPBA и DWPBA модела [7] поменуте четвороканалне WDM EPON мреже. Описани су начин размене саобраћаја и сигнализације између OLT-а и ONU јединица, алоцирање пропусног опсега за сваку класу саобраћаја и сваку ONU јединицу, као и размена MPCP порука. Такође су представљене и допуне MPCP протокола неопходне за имплементацију овог система и пружања описане QoS подршке.

## 4. Технике за уштеду енергије у PON

Прегледом литературе и предлаганих решења долази се до грубе поделе техника за уштеду енергије на хардверске и софтверске технике. Предлагане хардверске технике подразумевају развој нове архитектуре ONU јединице и/или искоришћење оптичког шума, док се софтверске технике за уштеду енергије огледају у новим или измењеним управљачким и сигнализационим протоколима, алгоритмима за расподелу пропусних опсега и начинима одабира брзина преноса података.

### 4.1. Софтверске технике

У наставку ће укратко бити описане технике које подразумевају контролисано искључивање/укључивање оптичког примопредајника ONU (*ONU Power Shedding*, *ONU Dozing* и *ONU Sleep*), као организацију начина преноса саобраћаја између OLT-а и ONU јединица комбиновано уз примену режима спавања.

#### 4.1.1. *ONU Power Shedding*

Применом ове технике [20] ONU смањује потрошњу енергије тако што једноставно искључује само неке од својих елемената и/или их користи за неке друге функције док се оптички линк оставља да ради у пуној функционалности. Пошто се примопредајник не искључује ова техника остварује минималну уштеду енергије уз обезбеђивање високих перформанси система.

#### 4.1.2. *ONU Dozing*

Ова техника искључује само оптички предајник на значајно време, док је оптички пријемник стално укључен [20]. Предајник је искључен док нема саобраћаја од корисника, док стална активност пријемника може спречити баферисање саобраћаја ка кориснику на OLT. Не постоји могућност гашења оптичког пријемника када нема саобраћаја ка кориснику па самим тим нема додатне уштеде енергије, али се може постићи уштеда меморијских елемената на OLT јер нема бафесирање саобраћаја ка кориснику.

### 4.1.3. ONU Sleep (ONU спавање)

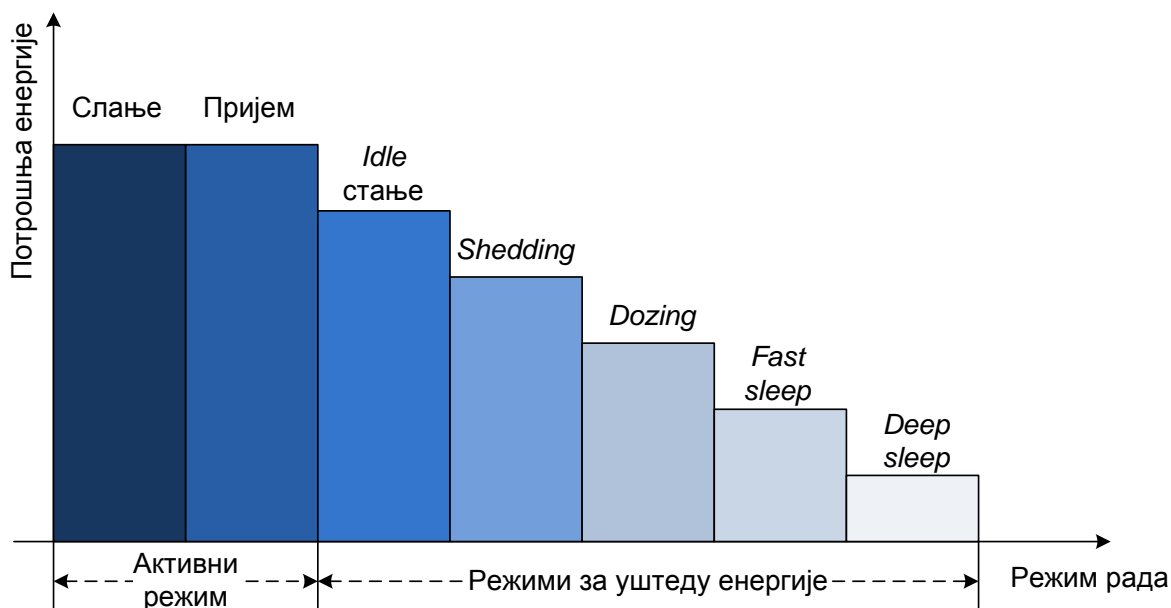
ONU Sleep представља стање у којем су и оптички пријемник и оптички предајник искључени у значајном временском периоду [20]. Разликујемо две ONU Sleep технике: Дубоко спавање (енгл. *Deep sleep*) и Брзо-периодично спавање (енгл. *Fast/cyclic sleep*).

У режиму дубоког спавања и пријемник и предајник се искључују када нема ни саобраћаја од корисника ни саобраћаја ка кориснику. Иако у овом режиму ONU може да постигне максималну уштеду енергије, проблематична је деградација перформанси мреже због постојања могућности одбацивања (тј. губитака) долазних/одлазних пакета пристиглих док је ONU у овом режиму рада. Овај режим је погодан, на пример, када ONU није у употреби или када се губитак дела саобраћаја може толерисати.

Брзо-периодично спавање подразумева наизменичан прелазак ONU из стања спавања (када је оптички примопредајник потпуно искључен) у активно стање (када се обавља пренос саобраћаја) и обрнуто. Период времена када је ONU у активном стању (активни период) и потом период времена када је ONU у стању спавања (период спавања) чине један циклус спавања (енгл. *Sleep cycle*). Перформансе мреже код примене ове технике највише зависе од примењене шеме динамичке алокације пропусног опсега (DBA алгорита) која се користи за рачунање и додељивање периода спавања и активног периода у оквиру једног циклуса спавања.

Ове три софтверске технике омогућавају ONU рад у режиму уштеде енергије, а поређење учинка те уштеде је дато у [21]. Аутори у [21] наводе да, као што је и очекивано, највеће уштеде постиже техника ONU спавања. Сматра се да ова техника може да обезбеди најбоље резултате у уштеди енергије у будућим PON [22], па је због тога тренутно предмет интензивног изучавања. Поређење потрошње енергије приликом коришћења наведених софтверских техника је приказано на слици 4.1 [21].

Од осталих техника истичу се оне које истражују могуће уштеде изменом начина преноса података, а једну такву предлажу аутори у [23], и то у виду новог енергетски свесног MAC протокола који врши фиксну алокацију пропусног опсега – FBA (енгл. *Fixed Bandwidth Allocation*) за саобраћај од корисника и ка кориснику када систем ради у условима малог



Слика 4.1: Поређење потрошњи ONU јединице током различитих режима рада уз примену софтверских техника за уштеду енергије [21]

оптерећења. OLT непрекидно врши надзор пропусности система и заузетости ресурса и покреће механизме за уштеду енергије када год систем уђе у стање мале оптерећености, тј. када оптерећење падне испод дефинисаног прага. Како се у овој техници ONU налази у предефинисаним активним периодима и периодима спавања, односно размена саобраћаја са OLT се врши и унапред одређеним временским слотовима, не постоји могућност управљања QoS захтевима [21]. Такође се претпоставља постојање неограничених бафера у ONU који би баферисали сав саобраћај ка кориснику пристигао током периода спавања, што може да изазове значајно кашњење пакета.

У [24] се разматрају нови приступи за побољшање енергетске ефикасности различитих технологија оптичких приступних мрежа. Предмет рада су TDM-PON, WDM-PON, TWDM-PON, RTP и OFDMA-PON технологије приступних оптичких мрежа. Анализиране су могућности примене више механизма за уштеду енергије, појединачно и у међусобној комбинованој примени, и механизам увођења ONU јединице у режим спавања показао се као најефикаснији приступ за смањење потрошње енергије. Такође аутори наводе да је примена режима спавања применљива у све четири анализиране оптичке приступне технологије.

#### 4.1.4. Променљива брзина преноса података

Промена протока на линку – ALR (енгл. *Adaptive Link Rate*) се обезбеђује захваљујући могућности да се одабере брзина преноса података из скупа могућих и унапред предефинисаних брзина. У погледу енергетске ефикасности, ALR је широко распрострањен у бежичним мрежама где већина технологија, нпр. WiFi (енгл. *Wireless Fidelity*), може вршити пренос података на више брзина. Ова техника се може користити у PON мрежама где постоји могућност преноса на различитим брзинама (1 Gb/s, 2.5 Gb/s и 10 Gb/s). За коришћење ALR у 10G-EPON мрежама у [25] се предлаже једноставна шема која обезбеђује ONU јединици са више битских брзина преноса да подеси адаптивно брзину преноса на линку на основу до тада посматране количине саобраћаја. Аутори [25] су предложили хибридную шему уштеде енергије комбинујући ALR и ONU *Sleep* софтверске технике, где је пренос могућ на две брзине: 1 Gb/s и 10 Gb/s. Време режима мировања  $T$  се рачуна на основу  $i$ , интервала између оквира који се шаљу ка кориснику:

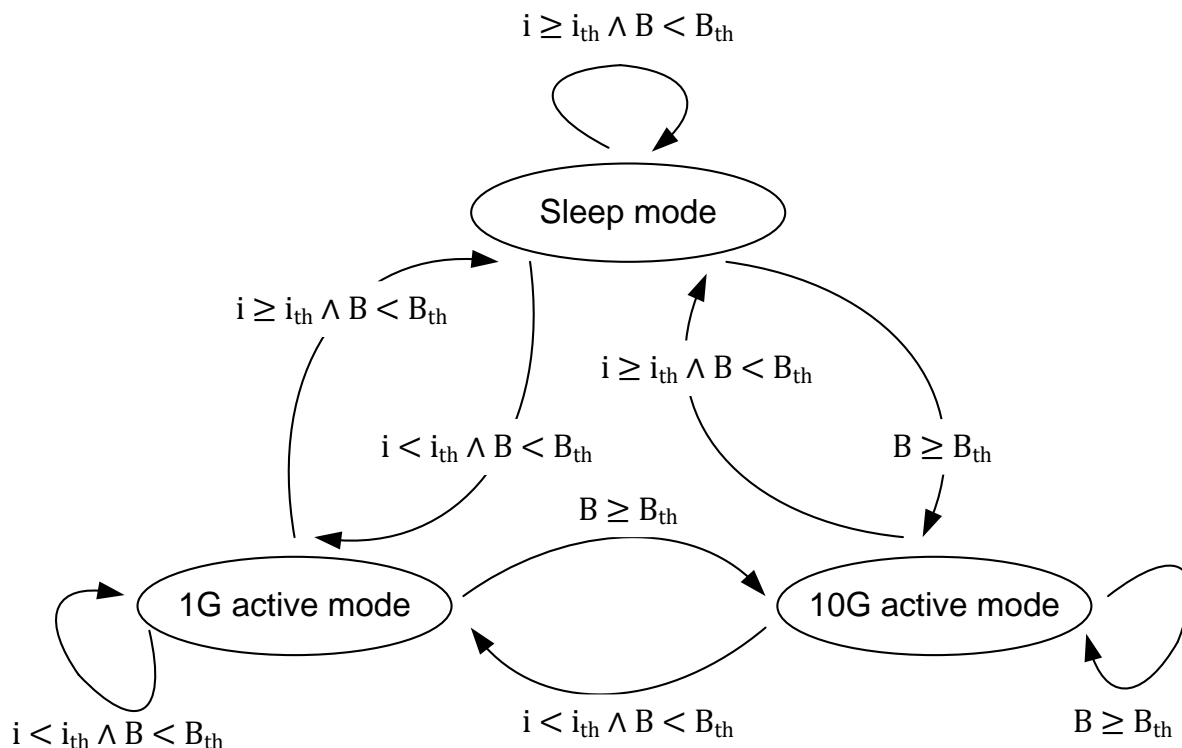
$$T = \begin{cases} T_s, & i \geq i_{th} \\ 0, & i < i_{th} \end{cases} \quad (4.1)$$

где је  $T_s$  унапред одређено време спавања, а  $i_{th}$  дефинисани праг за интервал између преноса два оквира који се шаљу ка кориснику. Овако се остварује контрола режима мировања. Контрола ALR се врши параметром  $D$  – брзином преноса саобраћаја ка кориснику која се одређује захтеваним пропусним опсегом  $B$  кроз MPCP REQUEST поруку:

$$D = \begin{cases} 10G, & B \geq B_{th} \\ 1G, & B < B_{th} \end{cases} \quad (4.2)$$

где је  $B_{th}$  означава праг пропусног опсега за саобраћај ка кориснику.

Хибридна шема се реализује спајањем ова два контролна механизма на начин приказан на слици 4.2. У симулацији механизма у [25] за поменуте параметре и прагове коришћене су следеће вредности:  $i_{th} = 20 \text{ ms}$ ,  $T_s = 10 \text{ ms}$  и  $B_{th} = 50 \text{ Mb/s}$ . Ова техника омогућава минимизацију времена активног режима рада ONU јединице, чиме се продужава режим мировања ради веће уштеде енергије.



Слика 4.2: Имплементација хибридног механизма из [25]

## 4.2. Хардверске технике

### 4.2.1. Нова ONU архитектура

Пошто архитектура стандардизоване IEEE 802.3ah ONU јединице не подржава имплементацију технологија за уштеду енергије у PON, аутори [26] предлажу нове архитектуре ONU које ће омогућити њихово имплементирање. Предложене су три GR-ONU (енгл. *Green ONU*) архитектуре и њихове потрошње електричне енергије су поређене са потрошњом стандардизоване ONU. Прва архитектура, GR-ONU-1, је предвиђена да буде најсличнија STD-ONU (енгл. *Standard ONU*), јер би имала исту архитектуру уз омогућен прелазак у режим спавања користећи се својим уграђеним тајмером. Предност GR-ONU-1 архитектуре је у томе што није неопходан развој и производња нових ONU, а гашењем великог броја елемената ONU се постиже значајна уштеда енергије. Ипак, велико време потребно за поновно паљење тих елемената приликом преласка ONU из режима спавања у активни режим рада може да утиче на нарушавање гарантованог QoS-а. Тај прелазак у активно стање подразумева стабилизацију ласера, опоравак бројача и успостављање синхронизације, па да би се постигао компромис између перформанси и уштеде енергије мора се редуковати број елемената који би се гасио. Аутори у [26] зато представљају и GR-ONU-2 и GR-ONU-3 архитектуре. GR-ONU-2 архитектура практично оставља део свог хардвера упаљеним у режиму спавања тако да је краће време буђења добијено на основу мањег броја електронских елемената који се поново укључују. Последица тога је већа потрошња електричне енергије ONU у режиму спавања. У GR-ONU-3 архитектури акценат је на минимизирању времена буђења ONU што се постиже гашењем само елемената неопходних да ONU пређе у режим спавања. Као што је и очекивано потрошња овакве јединице у режиму спавања је већа него код осталих наведених архитектура. Поређење



времена буђења и потрошње енергије у различитим режимима рада наведених архитектура је табеларно приказано у [21], а на основу података из [20][26][27].

Потребно је напоменути да наведене архитектуре не могу постићи уштеду енергије без софтверских измена и протокола који ће управљати њиховим режимима рада. Иако GR-ONU-2 и GR-ONU-3 имају боље карактеристике и постижу боље перформансе у односу на GR-ONU-1, због новог развоја и трошкова инсталације предност има GR-ONU-1 због своје широке распрострањености и укључености у развој будућих PON [28]. Ради смањивања великог времена буђења GR-ONU-1 које утиче на QoS параметре неопходно је развити механизам који може интелигентно управљати режимима рада GR-ONU-1 и као такав мора имати могућности примене и у било којим другим будућим ONU архитектурама.

#### 4.2.2. Искоришћење оптичког шума

Као решење којим се може постићи повећање удаљености ONU од OLT, а да се притом услед повећања влакна оптички сигнал не ослаби и деградира тако да дође до прекида преноса података, наводи се опремање ONU полупроводничким оптичким појачавачима – SOA (енгл. *Semiconductor Optical Amplifier*) [29]. Пошто SOA повећава укупну потрошњу електричне енергије у ONU, аутори у [29] предлажу нову технику која ће искоришћавати оптички шум појачавача како би се енергијом напајале све ONU. Овакво решење омогућава повећање броја корисника и/или њихову већу удаљеност од OLT-а уз мањи или исти утрошак енергије у мрежи.

### 4.3. Резиме

Овај део докторке дисертације даје преглед механизма за уштеду енергије у пасивним оптичким мрежама. Технике за уштеду енергије које се срећу у литератури се грубо могу поделити на софтверске и хардверске. Софтверске технике за уштеду енергију подразумевају гашење елената ONU јединице, гашење само оптичког предајника у ONU, гашење и пријемника и предајника у ONU и промену брзине рада оптичких примопредајника. У литератури се такође среће и поређење софтверских техника. Хардверски механизми за уштеду енергију се могу реализовати са новом архитектуром ONU јединице и искоришћењем оптичког шума.

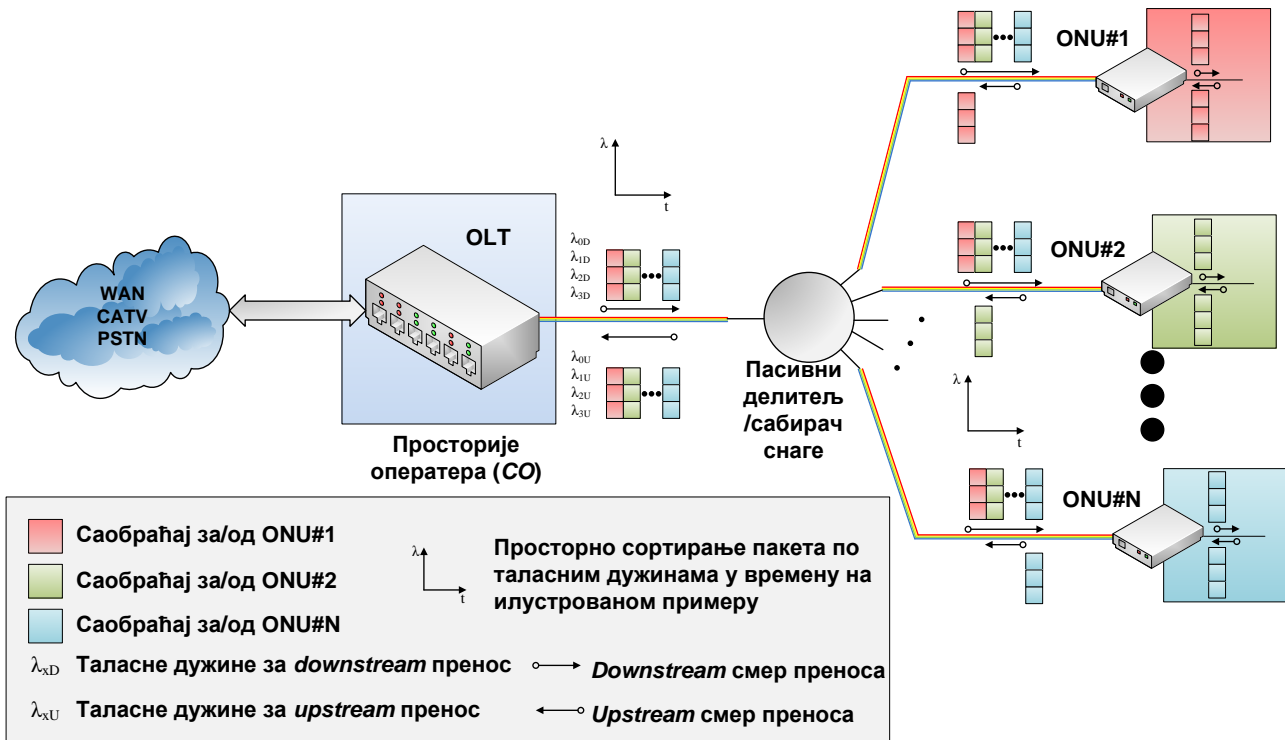
## 5. Енергетски ефикасна WDM EPON мрежа

Имплементацијом механизма за уштеду енергије у четвороканални WDM EPON, детаљно дефинисаним у [7], и ефикасном доделом пропусног опсега добијамо енергетски ефикасан WDM EPON – EE WDM EPON. Као механизам који омогућава највећу уштеду енергије у ONU јединици за имплементацију је одабран и прилагођен Режим спавања. У постојећим EPON системима OLT све пакете пристигле из транспортног дела мреже оператора прослеђује ка свим ONU јединицама. ONU јединица након обраде заглавља сваког пакета зна да ли је тај пакет намењен баш њој, и ако јесте прима га у целости и обрађује док га у супротном одбацује. Код оваквог начина преноса саобраћаја ка кориснику пријемници ONU јединица морају стално бити активни како би примали све пакете у систему јер услед неорганизоване природе слања етернет пакета у OLT-у нема могућности да ONU јединице знају који пакети су за њих сем да провере сваки. Осим стално активних пријемника у ONU јединицама, велики потрошач енергије је и њихова процесорска јединица која стално ради проверу заглавља пакета. Да би ONU јединица могла да оде у режим спавања без губитка корисничког саобраћаја она са сигурношћу мора да зна у ком временском периоду и по којим таласним дужинама може да угаси пријемнике и ослободи процесорску јединицу непотребне обраде пакета. Како би се омогућила имплементација Режима спавања најпре је неопходно да се и природа саобраћаја ка кориснику организује тако да уместо емисионог слања пакета имамо TDM пренос пакета као и у смеру од корисника. Управљање доделом пропусног опсега се врши у OLT-у применом нових DBA алгоритама. Ти алгоритми сада врше алокацију пропусног опсега за сваку ONU јединицу и у ONU јединицама и у OLT-у, а да притом сви QoS параметри остају ненарушени у односу на [7]. FWPBA и DWPBA модели четвороканалног WDM EPON-а пружају подршку за имплементацију квалитета сервиса и та подршка се не сме угрозити приликом пружања додатне подршке за енергетски ефикасан рад. У овом поглављу ће најпре бити представљен начин уређења преноса саобраћаја у EE WDM EPON-у, потом механизми за уштеду енергије који се имплементирају и на крају три шеме за алокацију пропусног опсега. Наравно, измене у виду додатних поља за подршку енергетски ефикасног начина рада мреже су неопходне у MPCP порукама и те измене су представљене на крају поглавља.

## 5.1. Реорганизација начина преноса саобраћаја у смеру ка кориснику

У свим раније представљеним EPON приступним мрежама пренос пакета у смеру ка кориснику, тј. од OLT-а ка ONU јединицама је био емисионе природе, односно сви пакети су се слали ка свим ONU јединицама које су након обраде заглавља пакета проверавале да ли је тај пакет за њу или не. Дакле, као што се примећује пријемници свих ONU јединица су све време током рада система активни и обрађују много већу количину заглавља пакета него што је то заиста и потребно. Сва та обрада пакета изискује одређену процесорску активност, која је доминантни потрошач у ONU јединицама. Како би се смањила процесорска обрада, а самим тим и потрошња ONU јединице предлаже се слање пакета ка свакој ONU јединици у засебним временским слотовима. Тако би ONU јединице могле да буду активне само у току трајања тог временског слота, јер се тада шаљу пакети који су намењени њој. У остатку времена, ван тог временског слота, ONU јединица нема потребу да врши обраду заглавља пакета јер се зна да ти пакети нису намењени њој. Другим речима, имамо пренос пакета у смеру ка кориснику организован на исти начин као и у смеру од корисника у 802.3ah EPON-у, тј. као у класичном EPON-у. Дакле, сада се мултиплексирање по времену врши и у смеру преноса од корисника, како не би дошло до колизије ако шаље више ONU јединица истовремено, али и у смеру ка кориснику како би пријемници ONU јединица били неактивни док се преноси саобраћај намењен осталим јединицама у систему. Због тога је сада потребно и у OLT-у баферисати саобраћаја који долази из транспортног дела мреже оператора све до момента када не дође слот намењен преносу тих пакета. Тај баферисани саобраћај ће се ONU јединици у тачно одређеном периоду, о којем ће раније она бити и обавештена од стране OLT-а, и проследити. Када не бисмо имали бафере пакети који пристигну у OLT, а није у том тренутку за пренос отворен временски слот намењен за пренос тих пакета они би морали бити одбачени чиме се нарушава квалитет сервиса због губитка корисничког саобраћаја. Начин преноса пакета у енергетски ефикасној WDM EPON мрежи је приказан на слици 5.1.

Због увођења TDM принципа у пренос саобраћаја ка кориснику неопходно је у OLT-



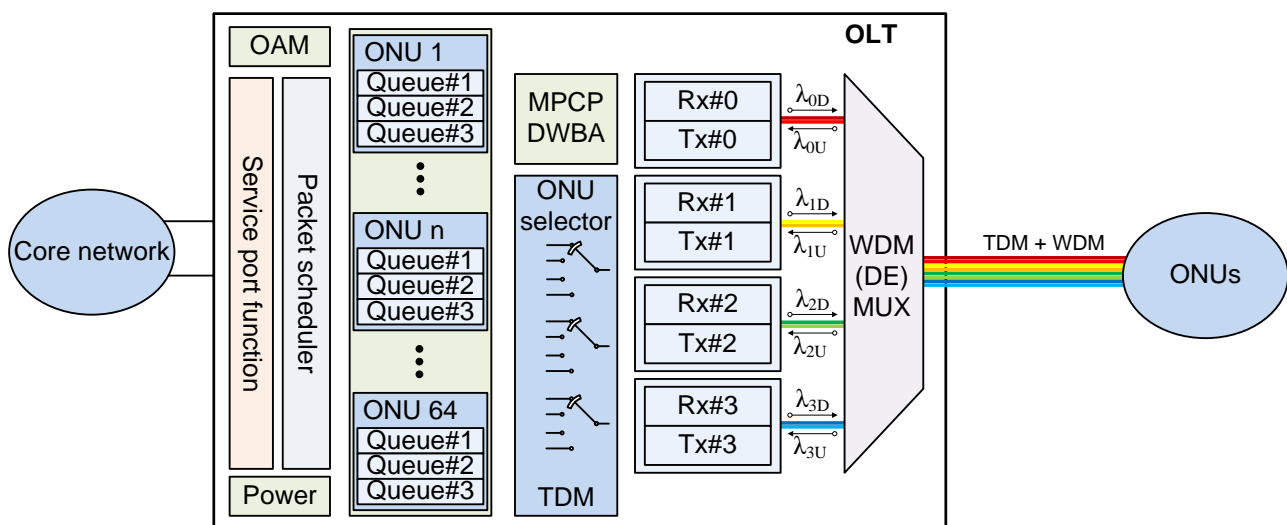
Слика 5.1: Архитектура EE WDM EPON система и илустрација размене саобраћаја између OLT-а и ONU јединица по таласним дужинама

у баферисање тог саобраћаја као и његова класификација најпре према одредишној ONU јединици, па потом и према класи саобраћаја. Због овога су потребне измене архитектуре OLT јединице, а те измене би се односиле на инсталирање додатне меморије (бафера) и њихову организацију, као и промена алгоритма који прослеђује пакете из бафера ка ONU јединицама. Алгоритми за доделу пропусног опсега су сада одговорни не само за алокацију временских слотова у оба смера преноса, него и за њихову синхронизацију тако да се пренос у оба смера врши истовремено, тј. да се временски слотови поклопе у времену тако да ONU јединица истовремено и прима и шаље пакете. Са синхронизацијом пријема и слања саобраћаја у ONU јединици се максимизују могућности за уштеду енергије применом режима спавања. Архитектура нове OLT јединице са инсталираним баферима за прављење TDM природе саобраћаја ка кориснику је приказана на слици 5.2.

Што се тиче архитектуре ONU јединице са режимом спавања, то је у основи иста архитектура као код четвороканалног WDM EPON система, с тим што је омогућен прелазак јединице у неактивни режим користећи се својим уграђеним бројачем који је синхронизован са OLT-овим, тј. централним. Након пријема GATE порука ONU јединица одмах прелази у режим спавања и на основу примљеног израчунатог временског слота који јој је додељен подешава свој бројач. На основу подешеног времена ONU јединица зна када треба да се пробуди, па након времена буђења улази у активно стање. Сада се активно стање јединице не користи само за слање саобраћаја од корисника већ и за пријем саобраћаја ка кориснику, јер се тада у оба смера преноси само саобраћај те ONU јединице. После завршетка размене саобраћаја и слања REQUEST поруке ка OLT-у, ONU јединица се враћа у неактивно стање до добијања нове GATE поруке од OLT-а. Предност је у томе што се не захтева разматрање и развој нових ONU јединица, а може се остварити уштеда енергије искључивањем већине њеног хардвера (тј. примопредајника, електронских кола и елемената, стављања процесора у неоптерећено (енгл. *idle*) стање) када се прелази у режим спавања.

## 5.2. Уштеда енергије увођењем ONU јединица у режим спавања

Један од најатрактивнијих механизма за смањење потрошње енергије у EPON мрежама је увођење ONU у режим мировања [21]. Режим спавања ONU јединице представља стање у којем су и оптички пријемник и оптички предајник искључени у значајном временском периоду. Као што је раније наведено разликују се два режима спавања и то су



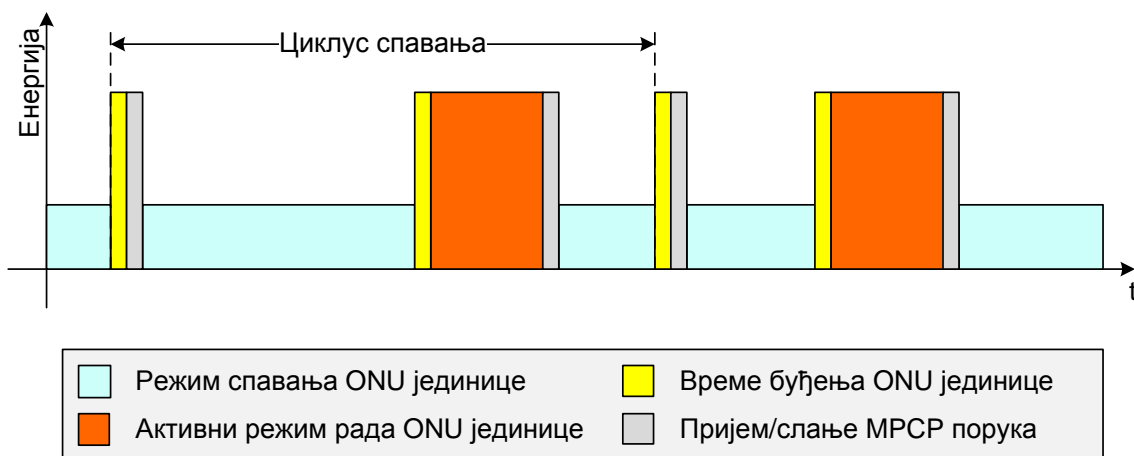
Слика 5.2: Архитектура OLT-а у EE WDM EPON систему

дубоко спавање и брзо-периодично спавање [20].

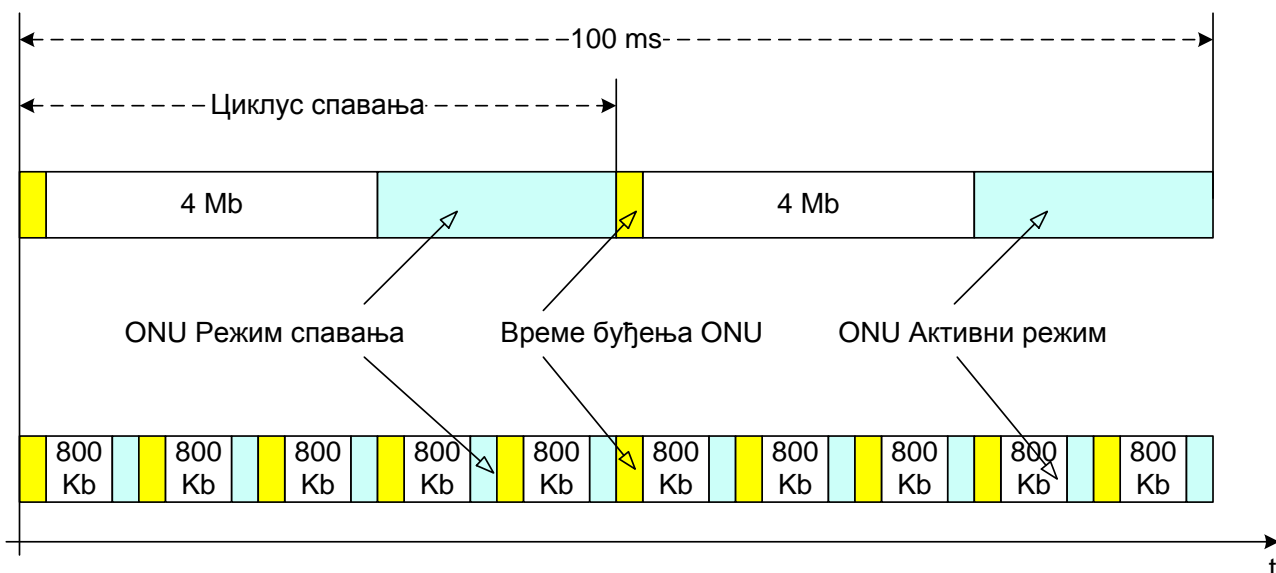
За имплементацију у ЕЕ WDM EPON је најпогоднија имплементација брзо-периодичног спавања, који подразумева наизменичан прелазак ONU из стања спавања, када је оптички примопредајник потпуно искључен, у активно стање ради преноса саобраћаја, и обрнуто. Електронски блокови у ONU јединици се не гасе потпуно, како би се очувала синхронизација и локални бројач остао активан и омогућио прелазак у активно стање. У неактивном режиму процесор ONU јединици је у неоптерећеном стању и тада му је потрошња енергије за ред величине мања него када се врши пријем пакета. Период времена између пријема две GATE поруке унутар којег је ONU јединица једном у активном стању, тј. активни режим рада, а током којег ONU буде једном или више пута у стању уштеде енергије, тј. режиму спавања, чине један циклус спавања (енгл. *Sleep cycle*) што је и илустровано на слици 5.3. Перформансе мреже код примене ове технике највише зависе од примењене шеме динамичке алокације пропусног опсега која се користи за рачунање и додељивање периода спавања и активног периода у оквиру једног циклуса спавања.

### 5.3. Масовни начин (енгл. *Batch-mode*) преноса

Приликом преласка ONU јединице из режима спавања у активно стање она се најпре нађе у периоду који зовемо време буђења (енгл. *overhead time*). Током времена буђења ONU јединица врши опоравак такта, синхронизације, паљење ласера, прелазак електронских кола у стање стабилног рада и слично. Током времена буђења нема уштеде енергије, а такође нема ни преноса саобраћаја, па је најбоље што више смањити њихов број. То се постиже повећањем циклуса спавања и тако омогућавањем масивног начина преноса – *batch-mode* преноса [7]. Главни циљ овакве стратегије је да се добије што је могуће већи период мировања ONU јединице како би се смањило укупно време буђења које се акумулира честим преласком ONU јединице између активног стања и стања мировања. На слици 5.4 приказана је разлика између *batch-mode* преноса у енергетски ефикасном WDM EPON-у (горњи део слике) и уобичајеног преноса (доњи део слике). Иако је укупно време активног режима рада исто за оба начина преноса (потребно за пренос количине података од 4 Mb), у предложеном ЕЕ WDM EPON-у ONU јединица проводи више времена у стању мировања због доста краћег акумулираног времена буђења, остварујући тако већу уштеду енергије. Конкретно, слика 5.4, коришћењем уобичајених шема преноса података укупно време буђења је  $10 \cdot 1ms = 10ms$  на хардверској архитектури ONU јединице приказане на слици 3.3 и коришћење у ЕЕ WDM EPON симулацијама. С друге стране, применом предложеног *batch-mode* преноса укупно време буђења ONU јединице је смањено на  $2 \cdot 1ms = 2ms$ . Коришћењем масовног начина



Слика 5.3: Трајање циклуса спавања у режиму рада ONU јединице у ЕЕ WDM EPON систему



Слика 5.4: Илустрација разлике између масивног начина преноса (горњи дијаграм) и уобичајеног, односно константног, преноса (доњи дијаграм) у етернет мрежама

преноса смањујемо укупно време буђења и повећавамо време спавања ONU јединице. Трајање циклуса спавања представља компромис између укупне уштеде енергије ONU јединице и кашњења саобраћајних пакета.

## 5.4. Фер додељивање временских слотова

Првобитни резултати симулација енергетски ефикасних четвороканалних WDM EPON мрежа су показали да се параметри квалитета сервиса разликују у зависности од распореда ONU јединица у симулацији. Примећено је да када се у сваком циклусу исти  $i$ -ти слот додељује  $ONU_i$  да се варијација кашњења пакета знатно разликује за ONU јединице са мањим  $i$  и за ONU јединице са већим  $i$ . Наиме, ако се у сваком циклусу ONU јединицама додељује различито трајање временског слота онда  $ONU_i$  размењује саобраћај са OLT-ом након  $i - 1$  временских слотова других ONU јединица. Сума тих  $i - 1$  временских слотова се разликује у сваком циклусу. Приметимо, на пример, да почетак временског слота  $ONU_2$  јединице зависи само од трајања временског слота  $ONU_1$  јединице, док почетак временског слота  $ONU_{23}$  јединице зависи од трајања слотова 22 ONU јединице. Овакав алгоритам доделе временских слотова није фер према свим ONU јединицама и због тога се у предложеном DBA алгоритму  $i$ -ти временски слот додељује ONU јединици по следећој формули:

$$T_i^{tc\_slot} \rightarrow ONU_{(c+i)modN} \quad (5.1)$$

где је  $T_i^{tc\_slot}$   $i$ -ти временски слот,  $c$  број протеклих сиклуса и  $N$  је број ONU јединица у систему. Дакле при иницијализацији система ( $c = 0$ ) први временски слот за пренос саобраћаја ће бити додељен  $ONU_1$ , други  $ONU_2$ , ...,  $n$ -ти  $ONU_n$ . У следећем циклусу ( $c = 1$ ) први временски слот ће бити додељен  $ONU_n$ , други  $ONU_1$ , ...,  $n$ -ти  $ONU_{n-1}$ . Оваква додела временских слотова чини представљене DBA алгоритам фер алгоритмом.

## 5.5. DBA алгоритми за EE WDM EPON

Динамичко додељивање пропусног опсега је техника којом се пропусни опсег намењен за пренос саобраћаја преко заједничког телекомуникационог ресурса, у овом случају оптичког влакна, може на захтев доделити и правично поделити између различитих

корисника тог пропусног опсега. Правила по којима се врши та додела и расподела пропусног опсега су дефинисана алгоритмом за динамичку алокацију пропусног опсега, односно скраћено DBA алгоритмом. Динамичка алокација пропусног опсега је у предности у односу на статичку јер у мрежи не морају сви корисници бити повезани (регистровани) на мрежу, па и када јесу повезани нису сви активни, тј. не преносе сви податке или не преносе у константној количини и времену. Са DBA алгоритмом имамо ефикасније управљање пропусним опсегом јер се његово дељење прилагођава тренутним саобраћајним захтевима корисника. Приликом доделе пропусног опсега DBA алгоритам мора истовремено да задовољи и кориснику гарантоване параметре ради имплементације квалитета сервиса, па се тако кориснику мора доделити пропусни опсег на начин да се испоштују минимално загарантовано кашњење пакета, брзина преноса, цитер и остало.

У EE WDM EPON мрежи, за разлику од других EPON система, због реорганизације начина преноса саобраћаја у смеру ка кориснику поред доделе пропусног опсега на основу захтева корисника имамо и доделу опсега на основу заузетости бафера у OLT-у. Дакле, додела пропусног опсега се више не односи само на *upstream* пренос саобраћаја, већ и на *downstream* смер преноса. Захваљујући новим баферима у OLT-у омогућујемо да ONU јединица може да пређе у режим спавања и тако оствари уштеду енергије. Ако ONU јединице проводе више времена у неактивном стању онда се наравно у бафере смести и већа количина саобраћаја који треба да се пренесе, а што су редови у баферима већи имамо веће додатно унесено кашњење пакета. Пошто се тежи да ONU јединица проведе што више времена у неактивном стању, јер је тада потрошња, примера ради, 1 W а у активном стању реда 10 W, мора се наћи компромис између максималне уштеде енергије и минималног додатно унесеног кашњења, што је још један изазов за DBA алгоритам у EE WDM EPON-у.

Коришћењем четири таласне дужине у EE WDM EPON-у имплементација DBA алгоритма постаје комплекснија јер је потребно извршити доделу пропусног опсега по све четири таласне дужине. Ради смањења комплексности DBA алгоритма и шеме за алокацију таласних дужина прави се фиксно мапирање између класе саобраћаја и таласне дужине. На овај начин правимо статичку алокацију таласних дужина и вршимо раздвајање TDM приступа, односно алокације пропусног опсега, од алокације таласних дужина. Са овим раздвајањем осим комплексности смањује се време у OLT-у потребно за обраде контролних порука, прорачуне, процесорску обраду и слично, чиме се врши ослобађање, тј. уштеда пропусног опсега, чиме се више ресурса ставља на располагање за пренос саобраћаја и тако се смањује његово кашњење.

Као што је наведено, кроз размену GATE и REPORT порука у оквиру MPCP алгоритма се дефинише сигнализациона комуникација у EPON систему. Према начину доделе пропусног опсега а у зависности од тренутка пријема контролних порука у OLT-у разликујемо два типа DBA алгоритма: са *offline* распоређивањем (енгл. *offline scheduling*) и са *online* распоређивањем (енгл. *online scheduling*). Приликом *offline* распоређивања OLT мора да прими REPORT MPCP поруке од свих ONU јединица регистрованих у мрежи како би онда на основу захтева из тих порука и стања локалних бафера покренуо прорачуне DBA алгоритма и извршио алокацију пропусног опсега. Када се користи *online* распоређивање OLT процесира примљене REPORT MPCP поруке независно од пријема порука других ONU јединица и по пријему додељује алоциране ресурсе ONU јединици од које је примила ту REPORT поруку.

Прва шема за динамичку доделу пропусног опсега EE-FWPBA уноси додатни фактор чекања неоптерећених таласних дужина да се ослободе и доделе следећој ONU јединици чиме се повећава додатно кашњење пакета, али се зато максимизује време ONU јединица проведено у режиму спавања. Следећи представљени алгоритам, EE-DWPBA алгоритам настоји да ослободи таласну дужину по којој је завршена размена саобраћаја и додели је следећој ONU јединици без обзира на ситуацију на остале две таласне дужине.

Тиме се смањује чекање пакета у баферима на пренос, али се ONU јединице остављају дуже у активном стању. Оба алгоритма на исти начин управљају укупним неискоришћеним пропусним опсегом, који се разликује за ова два алгоритма, док трећи алгоритам настоји да што више искористи тај неискоришћени пропусни опсег и на тај начин смањи времена чекања пакета у баферима. Тај алгоритам, EE-DWPBA-ASC, такође на другачији начин у односу на претходнике обрађује контролне поруке и на основу оптерећености целокупног система максимизује QoS перформансе или уштеду енергије, мењајући тако компромис у зависности од услова током рада.

### 5.5.1. EE-FWPBA алгоритам

Раније описани FWPBA модел [7] четвороканалне мреже је искоришћен као основа за енергетски ефикасни FWPBA (EE-FWPBA) алгоритма уз сво уважавање подршке за квалитет сервиса. Као што је то био случај у FWPBA тако се и овде таласне дужине додељене једној ONU јединици за пренос саобраћаја ослобађају тек када та ONU јединица заврши са разменом корисничких пакета све три класе саобраћаја и тек након тога се додељују следећој ONU јединици у систему. Сада се EE-FWPBA алгоритмом додељени пропусни опсег користи за пренос саобраћаја и у смеру од корисника и у смеру ка кориснику јер се примопредајници ONU јединице пале само у додељеном временском слоту. Дакле, осим алокације пропусног опсега EE-FWPBA шема мора да подеси временске интервале за пренос података.

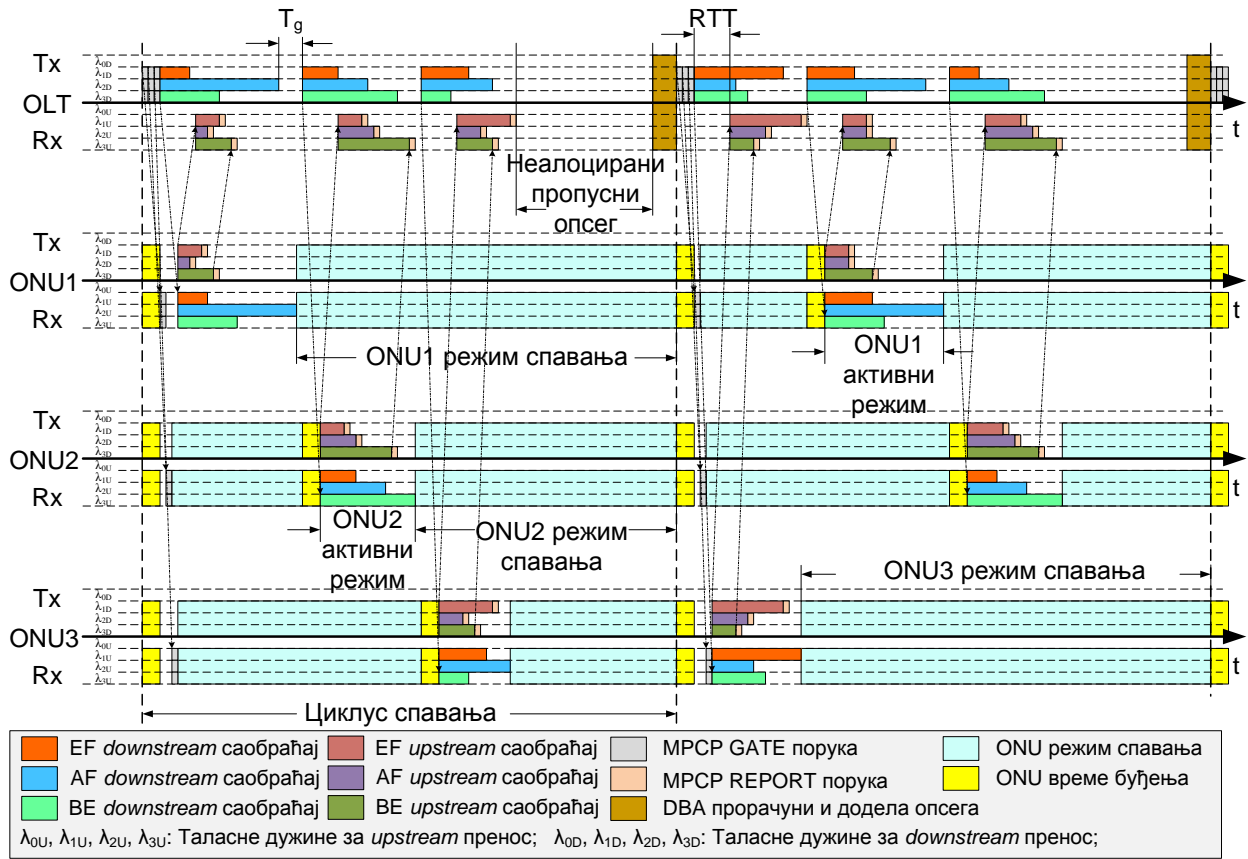
На слици 5.5 је приказана размена саобраћаја и контролних порука у оквиру EE-FWPBA шеме за алокацију пропусног опсега. Као што је приказано, док једна ONU јединица размењује саобраћај са OLT-ом остале ONU јединице у систему су неактивне, тј. оне су у режиму спавања. На крају сваког циклуса спавања OLT прави пресек заузетости својих бафера и на основу тог пресека и захтева за пропусним опсегом добијеним кроз REPORT поруке од сваке ONU јединице DBA блок у OLT-у рачуна колико ће пропусног опсега бити додељено ONU јединицама у наредном циклусу спавања. Нови циклус спавања почиње слањем GATE порука ONU јединицама након чега оне подешавају своје бројаче и прелазе у неактивно стање из ког ће изаћи тек пред почетак њима додељеног временског слота за пренос. Пошто се рачунање пропусних опсега у DBA блоку OLT-а врши тек по пријему REPORT порука од свих ONU јединица EE-FWPBA алгоритам је *offline* алгоритам за динамичку доделу пропусног опсега.

Укупни доступни капацитет, тј. пропусни опсег, по таласној дужини у једном циклусу спавања, означен са  $W^{total}$ , рачуна се на следећи начин:

$$W^{total} = R \cdot (T^{cycle} - (N - 1) \cdot T_g - T_{MPCP} - T_{RTT} - T_{PROCESSING}) \quad (5.2)$$

где је  $R$  линијска брзина преноса на таласној дужини,  $T^{cycle}$  максимална дужина трајања циклуса спавања,  $N$  број јединица у EE WDM EPON мрежи,  $T_g$  је заштитни интервал након слања података (од стране OLT-а) свакој ONU јединици ради елиминасања евентуалне колизије пакета,  $T_{MPCP}$  је временски период у једном циклусу спавања неопходан за пренос свих GATE контролних порука и  $T_{PROCESSING}$  је време у једном циклусу спавања неопходно за обраду свих примљених REPORT контролних порука и извршавање DBA алгоритма. Алоцирани пропусни опсег ONU<sub>*i*</sub> јединице, означен са  $W_i^{allocated}$  за размену саобраћаја од корисника и ка кориснику се добија помоћу следећих израза:





Слика 5.5: Илустрација размене саобраћаја, контролних порука, алокације таласних дужина и трајања временских слотова и времена спавања ONU јединица у оквиру EE-FWPBA алгоритма за алокацију пропусног опсега

$$W_i^{tc\_requested} = \max\{W_i^{tc\_downstream\_buffered}, W_i^{tc\_upstream\_requested}\}, \quad tc \in \{EF, AF, BE\}, \quad (5.3)$$

$$W_{total}^{tc\_requested} = \sum_{i=1}^N W_i^{tc\_requested}, \quad tc \in \{EF, AF, BE\} \quad (5.4)$$

$$w_i^{tc} = \frac{W_i^{tc\_requested}}{W_{total}^{tc\_requested}}, \quad tc \in \{EF, AF, BE\}, \quad (5.5)$$

$$W_i^{tc\_allocated} = \begin{cases} w_i^{tc} \cdot W_{total}^{tc\_requested}, & W_i^{tc\_requested} < W_i^{SLA\_max} \\ W_i^{SLA\_max}, & W_i^{tc\_requested} \geq W_i^{SLA\_max} \end{cases}, \quad tc \in \{EF, AF, BE\}, \quad (5.6)$$

$$W_i^{allocated} = \max\{W_i^{EF\_allocated}, W_i^{AF\_allocated}, W_i^{BE\_allocated}\}, \quad (5.7)$$

$$T_i^{slot} = \frac{W_i^{allocated}}{R} \quad (5.8)$$

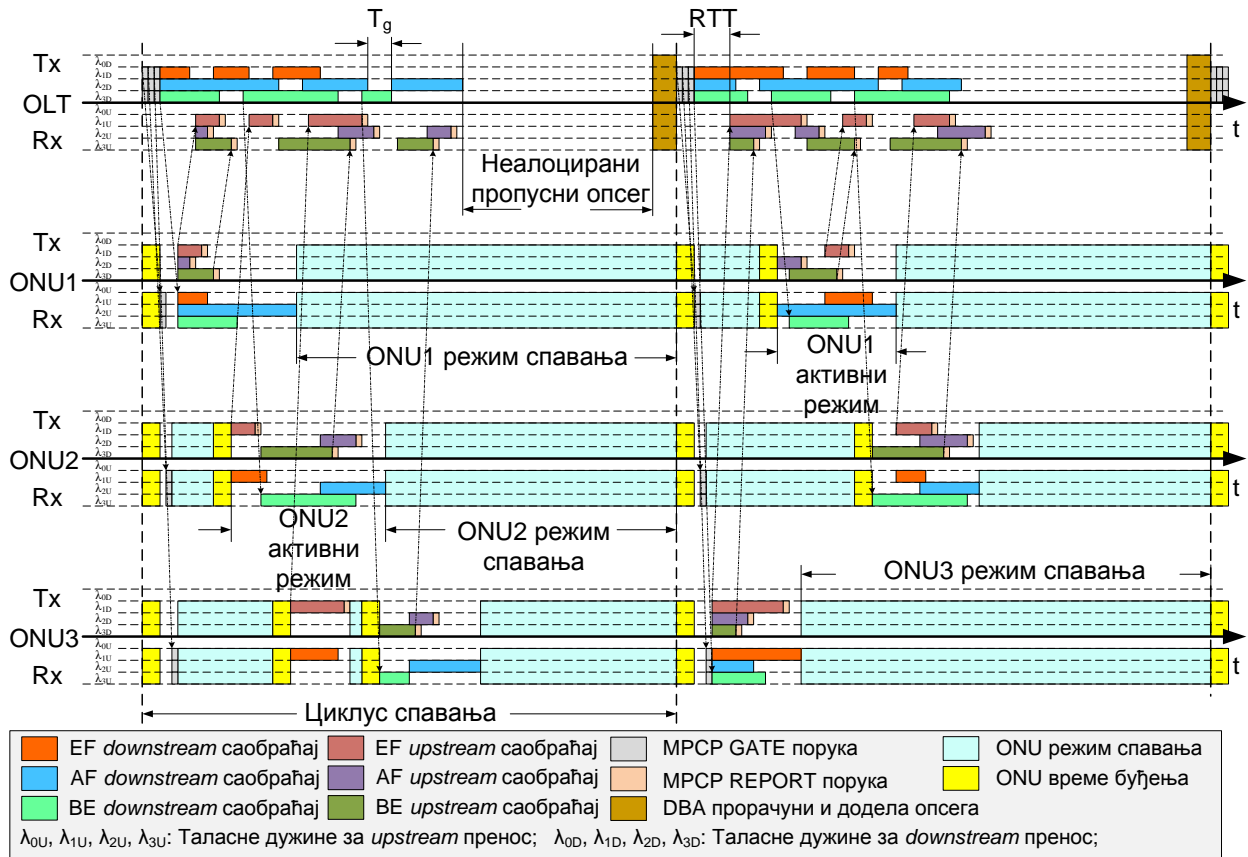
$$T_i^{sleep\_time} = T^{cycle} - T_i^{slot} - \sum T^{ONU\_wakeup} \quad (5.9)$$

при чему су  $W_i^{tc\_downstream\_buffered}$  у OLT-у баферовани саобраћаја класе  $tc$  за  $ONU_i$  јединицу,  $W_i^{tc\_upstream\_requested}$  захтевани пропусни опсег за  $tc$  класу саобраћаја од стране  $ONU_i$  јединице,  $W_i^{tc\_requested}$  пропусни опсег за  $tc$  класу саобраћаја  $ONU_i$  јединице који ће DBA блок разматрати као захтев,  $W_{total}^{tc\_requested}$  укупни захтевани пропусни опсег за  $tc$  класу саобраћаја за све  $ONU$  јединице,  $w_i^{tc}$  је тежински фактор додељени  $ONU_i$  за  $tc$  класу саобраћаја где за сваку класу важи да је  $\sum_{i=1}^N w_i^{tc} = 1$ ,  $W_i^{tc\_allocated}$  је пропусни опсег који је могуће доделити  $ONU_i$  за класу  $tc$ ,  $W_i^{allocated}$  је додељени пропусни опсег  $ONU_i$  јединици за пренос по све три таласне дужине, а  $W_i^{SLA\_max}$  је максимални дефинисани пропусни опсег који се може доделити  $ONU_i$  према SLA (енгл. *Service-Level Agreement*).  $T_i^{slot}$  је трајање временског слота додељеног  $ONU_i$  јединици за размену саобраћаја са OLT-ом, док  $T_i^{sleep\_time}$  представља време које  $ONU_i$  јединица може провести у режиму спавања, а све то у оквиру једног циклуса спавања који има трајање  $T^{cycle}$ . Време буђења  $ONU$  јединице у EE WDM EPON мрежи је описано константом  $T^{ONU\_wakeup}$  која је иста за све  $ONU$  у систему.

Овај алгоритам је представљен у [30] као део енергетски ефикасне WDM приступне мреже. Поред алгоритма у [30] су представљени и резултати симулација енергетски ефикасне WDM EPON мреже који показују колике се уштеде енергеје могу остварити применом EE-FWPBA алгоритма.

### 5.5.2. EE-DWPBA алгоритам

Како би се у односу на EE-FWPBA алгоритам постигло боље искоришћење пропусног опсега и побољшале QoS перформансе, првенствено додатно унесено кашњење пакета у смеру ка кориснику узроковано инсталирањем нових бафера у OLT-у, предлаже се EE-DWPBA алгоритам. Главна разлика у односу на претходно представљени алгоритам је то што се овде додељивање временског слота за пренос саобраћаја додељује независно свакој класи саобраћаја сваке  $ONU$  јединице у систему. Овај начин независног алоцирања пропусног опсега по таласним дужинама је сличан оном из DWPBA алгоритма представљеном у [7]. Главна новина у односу на тај алгоритам је што сада у DBA блоку осим примљених REPORT порука са захтевима  $ONU$  јединица на доделу пропусног опсега утиче и стање попуњености бафера у OLT-у. Као и у EE-FWPBA, тако и овде се од алгоритма за алокацију пропусног опсега очекује да свакој  $ONU$  јединици додели временске слотове за пренос саобраћаја у којима ће  $ONU$  јединица истовремено моћи и да шаље и да прима кориснички саобраћај. То је омогућено захваљујући TDM начину преноса баферисаног саобраћаја у OLT-у. Дакле, на крају сваког циклуса спавања OLT формира стање заузетости својих бафера и израчунава колики ће пропусни опсег бити додељена за сваку  $ONU$  јединицу и за сваку таласну дужину користећи добијене информације о ширини пропусног опсега које је претходно захтевала свака  $ONU$  јединица. Пошто EE-DWPBA шема за алоцирање пропусног опсега у DBA блоку OLT-у најпре мора да прими REPORT поруке од свих  $ONU$  јединица како би покренула операције за рачунање пропусног опсега имамо да је и ово *offline* алгоритам за динамичку доделу пропусног опсега. На почетку сваког циклуса спавања помоћу GATE порука OLT обавештава све  $ONU$  јединице о трајању циклуса спавања, као и дужини и почетку додељеног временског слота, и то независно за сваку класу саобраћаја. OLT сада уместо једне GATE поруке свакој  $ONU$  шаље три, и самим тим мора да врши три независне контроле почетка и трајања временских слотова у циклусу спавања, што чини ову динамичку расподелу опсега сложенијом у поређењу EE-FWPBA алгоритмом.  $ONU$  и OLT архитектуре су непромењене и односу на систем са EE-FWPBA алгоритмом. Дијаграм преноса саобраћаја и контролних пакета је приказан на слици 5.6. Као што се може



Слика 5.6: Илустрација размене саобраћаја, контролних порука, алокације таласних дужина и трајања временских слотова и времена спавања ONU јединица у оквиру EE-DWPBA алгоритма за алокацију пропусног опсега

закључити из описа EE-DWPBA алгоритма, а и јасно се уочава на слици 5.6, управљање пропусним опсегом је ефикасније, кашњења пакета су мања, али зато због несинхронизације временских слотова за преноса различитих класа саобраћаја ONU јединица дуже остаје у активном стању чиме се смањује уштеда енергије у односу на EE-FWPBA шему.

EE-DWPBA алгоритам рачуна доступан пропусни опсег по таласној дужини у оквиру једног циклуса спавања, означен са  $W_{total}^{tc}$ , на следећи начин:

$$W_{total}^{tc} = R \cdot (T_{cycle} - (N - 1) \cdot T_g - T_{MPCP} - T_{RTT} - T_{PROCESSING}), \quad (5.10)$$

Пропусни опсег  $W_i^{tc\_requested}$  који је ONU<sub>i</sub> јединици потребан за пренос саобраћаја  $tc$  класе у следећем циклусу спавања се формира на основу захтеваног пропусног опсега и стања бафера у OLT-у, применом израза (5.3). DBA блок додељује пропусни опсег  $W_i^{tc\_allocated}$  за  $tc$  класу саобраћаја ONU<sub>i</sub> јединици следећим принципом:

$$W_i^{tc\_allocated} = \begin{cases} W_i^{tc\_requested}, & W_i^{tc\_requested} < W_i^{SLA\_max} \\ W_i^{SLA\_max}, & W_i^{tc\_requested} \geq W_i^{SLA\_max} \end{cases}, tc \in \{EF, AF, BE\}, \quad (5.11)$$

Потом се за сваку класу саобраћаја свакој ONU јединици додељује три временска слота у трајању од  $T_i^{EF\_slot}$ ,  $T_i^{AF\_slot}$  и  $T_i^{BE\_slot}$ , по један на свакој од таласних дужина:

$$T_i^{tc\_slot} = \frac{W_i^{tc\_allocated}}{R}, tc \in \{EF, AF, BE\} \quad (5.12)$$

$$t_i^{tc\_start\_tx} = \begin{cases} T_{MPCP}, (c+1) \bmod N = i \\ T_{MPCP} + \sum_{j=(c+1) \bmod N}^{i-1} (T_j^{tc\_slot} + T_g), (c+1) \bmod N \neq i \end{cases} \quad (5.13)$$

$$tc \in \{EF, AF, BE\}$$

Сада је размена саобраћаја  $ONU_i$  јединице у следећем циклусу спавања омогућена кроз временске слотове који су дефинисани својим трајањем и својим временом почетка у том циклусу спавања. Временске слотове можемо представити као уређене парове ова два параметра, и то по један за сваку класу саобраћаја па имамо да су дефинисани као  $(T_i^{EF\_slot}, t_i^{EF\_start\_tx})$ ,  $(T_i^{AF\_slot}, t_i^{AF\_start\_tx})$  и  $(T_i^{BE\_slot}, t_i^{BE\_start\_tx})$ .

ЕЕ-DWPBA понавља изразе (5.10), (5.3), (5.11), (5.12) и (5.13) за сваку  $ONU$  јединицу и за сваку њену класу саобраћаја  $tc$ . Након тога, OLT рачуна колики је неалоцирани пропусни опсег за сваку класу саобраћаја, тј. сваку таласну дужину, у следећем циклусу спавања:

$$W_{total}^{tc\_free} = W^{total} - \sum_{j=1}^N W_j^{tc\_allocated}, tc \in \{EF, AF, BE\} \quad (5.14)$$

Део циклуса спавања када  $ONU_i$  јединица, где је  $i \in \{1 \dots N\}$ , не размењује саобраћаја кроз додељене временске слотове за сваку класу саобраћаја дефинисане временом почетка и дужином трајања, односно када ни један примопредајник није упаљен, је неактивни период  $ONU_i$  јединице, тј. време које проведе у режиму спавања -  $T_i^{sleep\_time}$ .

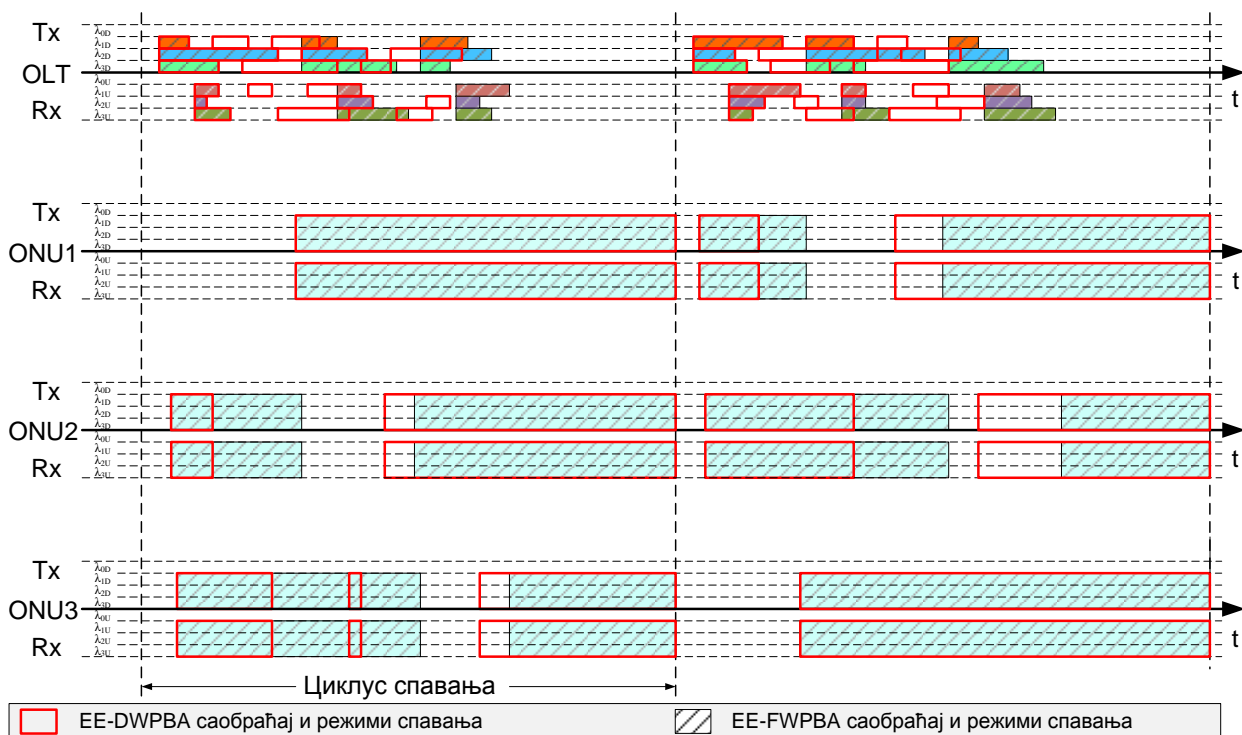
Ради лакшег посматрања и поређења са осталим предложеним енергетски ефикасним шемама неопходно је забележити проценат укупног неалоцираног пропусног опсега таласних дужина, као и укупан проценат времена које  $ONU$  јединица проведе у неактивном стању, тј. проценат уштеде енергије уколико знамо колика је потрошња  $ONU$  јединица у активном стању и у режиму спавања. Ови прорачуни, као и касније симулације, раде се за неки велики временски период који обухвата велики број циклуса спавања  $M$  ( $M \cdot T^{cycle}; M \rightarrow \infty$ ):

$$W^{tc\_total\_free} [\%] = \frac{\sum_{c=0}^M W_{total}^{tc\_free}}{M \cdot W^{total}} \cdot 100, tc \in \{EF, AF, BE\} \quad (5.15)$$

$$W^{system\_total\_free} [\%] = \frac{\sum_{tc} W^{tc\_total\_free} [\%]}{3}, tc \in \{EF, AF, BE\} \quad (5.16)$$

$$T_i^{ONU\_inactive\_time\_total} [\%] = \frac{\sum_{c=0}^M T_i^{sleep\_time}}{M \cdot T^{cycle}} \cdot 100 \quad (5.17)$$

где је  $W^{tc\_total\_free} [\%]$  проценат неалоцираног пропусног опсега намењеног за  $tc$  класу саобраћаја у  $M$  циклуса спавања,  $W^{system\_total\_free}$  проценат укупно неалоцираног пропусног опсега на све три таласне дужине у  $M$  циклуса спавања, а  $T_i^{ONU\_inactive\_time\_total} [\%]$  проценат времена које је  $ONU_i$  јединица провела у режиму спавања током  $M$  циклуса спавања.



Слика 5.7: Визуелно поређење времена спавања, трајања активних режима ONU јединица и неалоцираних пропусних опсега EE WDM EPON-у применом EE-FWPBA и EE-DWPBA алгоритама

Илустрације размене саобраћаја у оквиру EE-FWPBA и EE-DWPBA алгоритама на сликама 5.5 и 5.6 су направљене за исти пример пакета ка и од корисника. Добијени резултати примене оба алгорита за тај пример су ради лакшег поређења здружено приказани на слици 5.7. Преклапањем резултата за дати пример на слици 5.7 се визуелно уочава да OLT јединица знатно раније заврши размену саобраћаја са ONU јединицама у оквиру једног циклуса спавања применом EE-DWPBA алгорита, док су режими спавања нешто дужи применом EE-FWPBA алгорита. У [31] су представљени EE-DWPBA алгорита са свим својим унапређењима у односу EE-FWPBA, као и упореда симулациона анализа перформанси и уштеда енергије применом ова два алгорита.

### 5.5.3. EE-DWPBA-ASC алгорита

Циљ овог алгорита је постизање максималног QoS у свим режимима рада. Састоји се од првог дела алгорита који је EE-DWPBA у неизмењеном облику по питању доделе пропусног опсега ONU јединицама. Додатак алгориту је вођење записа о ONU јединицама које нису добиле захтевани пропусни опсег или чији баферисани саобраћај у OLT-у премашује капацитет додељеног пропусног опсега. Уколико се детектују такве јединице онда се у току циклуса спавања покреће други део алгорита који за забележене ONU јединице алоцира додатни пропусни опсег како би се пренео саобраћај за који првобитно није обезбеђен пропусни опсег а захтеван је преко стања OLT бафера или кроз REPORT поруке. Такође се током доделе пропусног опсега прати стање о укупном захтеваном пропусном опсегу по свакој таласној дужини и уколико се детектује да је укупан захтевани пропусни опсег већи од расположивог на тој таласној дужини смањује се трајања циклуса спавања на минималну дефинисану вредност. Тиме се при стању повећаног саобраћаја фреквентније додељују временски слотови за пренос саобраћаја ONU јединицама и смањује додатно кашњење пакета које је мање или једнако трајању два циклуса спавања. Када се детектује да

нема повишених захтева за пропусним опсегом, циклус спавања се повећава чиме се повећава и уштеда енергије. Овај механизам се назива адаптивни циклус и њиме се постиже побољшање параметара квалитета сервиса у условима повишеног саобраћаја у мрежи, док се при слабијем интензитету саобраћаја повећавају могућности уштеде енергије у систему уз пружање сервиса ненарушеног квалитета.

Овај *online* DBA алгоритам са адаптивним циклусом спавања састоји се од три логичка дела: а) примарна расподела пропусног опсега након пријема свих REPORT порука на крају сваког циклуса спавања; б) додатна расподела пропусног опсега током циклуса спавања одмах након пријема REPORT порука од ONU јединица; и ц) одређивање трајања циклуса спавања на основу тренутних оптерећења бафера у OLT-у и ONU јединицама. Ови делови су објашњени у наставку.

### 5.5.3.1. Примарна додела пропусног опсега – *offline* део алгоритма

Овај део алгоритма можемо сматрати *offline* делом EE-DWPBA-ASC. Размена контролних порука идентична је размени описаној у EE-DWPBA алгоритму. И овде OLT обавештава ONU јединице о додељеним пропусним опсезима за сваку таласну дужину, за разлику од јединствене доделе пропусног опсега за све класе саобраћаја која се примењује у EE-FWPBA. По завршетку размене саобраћаја ONU јединице користе REPORT поруке да би захтевале пропусни опсег за сваку класу саобраћаја независно. На крају сваког циклуса спавања, OLT формира стања заузетости својих бафера и израчунава колика ће ширина пропусног опсега бити додељена за сваку таласну дужину сваке ONU јединице, користећи за прорачуне информације о захтеваној ширини опсега које је претходно добио у REPORT порукама и тренутном стању својих бафера. За рачунање  $W^{total}$  - доступног пропусног опсега по таласној дужини у оквиру једног циклуса спавања и  $W_i^{tc\_allocated}$  - додељеног пропусног опсега ONU<sub>i</sub> јединици за *tc* класу саобраћаја користе се изрази (5.10), (5.3) и (5.11) на исти начин као и у EE-DWPBA алгоритму. Сада се води белешка о ONU јединицама којима није додељен захтевани пропусни опсег тако што се уводи обележивач (енгл. *flag*)  $F_i^{tc\_unallocated}$  за сваку класу саобраћаја *tc* ONU<sub>i</sub> јединице и постаје активан, тј. добија вредност 1, када се ONU<sub>i</sub> јединици не додели захтевани пропусни опсег за *tc* класу саобраћаја:

$$F_i^{tc\_unallocated} = \begin{cases} 0; & W_i^{tc\_requested} \leq W_i^{tc\_SLA\_guaranteed} \\ 1; & W_i^{tc\_requested} > W_i^{tc\_SLA\_guaranteed} \end{cases}, \quad (5.18)$$

$tc \in \{EF, AF, BE\}$

Количина пропусног опсега који није тада алоциран за *tc* класу саобраћаја, а захтеван је од стране ONU<sub>i</sub> јединице је  $W_i^{tc\_unallocated}$  и описује се следећим изразом:

$$W_i^{tc\_unallocated} = W_i^{tc\_requested} - W_i^{tc\_allocated}, \quad F_i^{tc\_unallocated} = 1, \quad (5.19)$$

$tc \in \{EF, AF, BE\}$

Када се забележи којој ONU јединици није додељен тражени пропусни опсег и колики је тај пропусни опсег следи рачунање алоцираних временских слотова за сваку ONU и сваку таласну дужину применом израза (5.12) и (5.13). Кроз GATE поруке се ONU јединице поред почетка и трајања алоцираних временских слотова обавештавају и о дужини трајања циклуса спавања. Дужина циклуса спавања  $T_i^{sleep\_cycle}$  сада није иста за све ONU јединице, зависно од тога да ли су им додељени тражени капацитети на таласним дужинама или не:

$$T_i^{tc\_sleep\_cycle} = \begin{cases} T^{cycle}; F_i^{tc\_unallocated} = 0 \\ T_{MPCM} + \sum_{j=1}^N (T_j^{tc\_slot} + T_g); F_i^{tc\_unallocated} = 1' \end{cases} \quad (5.20)$$

$tc \in \{EF, AF, BE\}$

$$T_i^{sleep\_cycle} = \min(T_i^{EF\_sleep\_cycle}, T_i^{AF\_sleep\_cycle}, T_i^{tc\_sleep\_cycle}) \quad (5.21)$$

Овим се ONU јединице које нису добиле захтевани капацитет за размену саобраћаја обавештавају да након завршетка размене саобраћаја остану у активном режиму како би могле примити GATE поруку са додатним додељеним пропусним опсегом. У тој GATE поруци је нова дужина циклуса спавања таква да се завршава тачно када и циклус спавања који је прослеђен ONU јединицама које су на почетку добиле захтеване пропусне опсеге.

### 5.5.3.2. Додатна додела пропусног опсега – *online* део алгоритма

Други део ЕЕ-DWPВА-ASC алгоритма је додељивање додатног пропусног опсега ONU јединицама које нису на почетку циклуса спавања добиле захтевани пропусни опсег. OLT рачуна време заузето претходно алоцираним временским слотовима на свакој таласној дужини:

$$t^{tc\_allocated} = T_{MPCP} + (N - 1)T_g + \sum_{j=1}^N T_j^{tc\_slot}, tc \in \{EF, AF, BE\} \quad (5.22)$$

Након тога OLT рачуна за сваку класу саобраћаја колики је неискоришћени пропусни опсег на придруженој таласној дужини,  $W_{total}^{tc\_free}$ , и колико је укупно додатно захтевано, а првобитно недодељеног, пропусног опсега -  $W_{total}^{tc\_unallocated}$ .

$$W_{total}^{tc\_free} = W_{total} - R \cdot N^{tc} \cdot T_g - \sum_{j=1}^N W_i^{tc\_allocated}, tc \in \{EF, AF, BE\} \quad (5.23)$$

$$W_{total}^{tc\_unallocated} = \sum_{j=1}^N F_i^{tc\_unallocated} \cdot W_i^{tc\_unallocated}, tc \in \{EF, AF, BE\} \quad (5.24)$$

где је  $N^{tc}$  број ONU јединица које су захтевале веће пропусне опсеге од додељених на тој таласној дужини, односно за  $tc$  класу саобраћаја ( $N^{tc} \leq N$ ). Такође се рачунају и тежински фактори неискоришћености таласних дужина  $w_{unused}^{tc}$  помоћу којих OLT сразмерно распоређује недодељени пропусни опсег ONU јединицама које га траже.

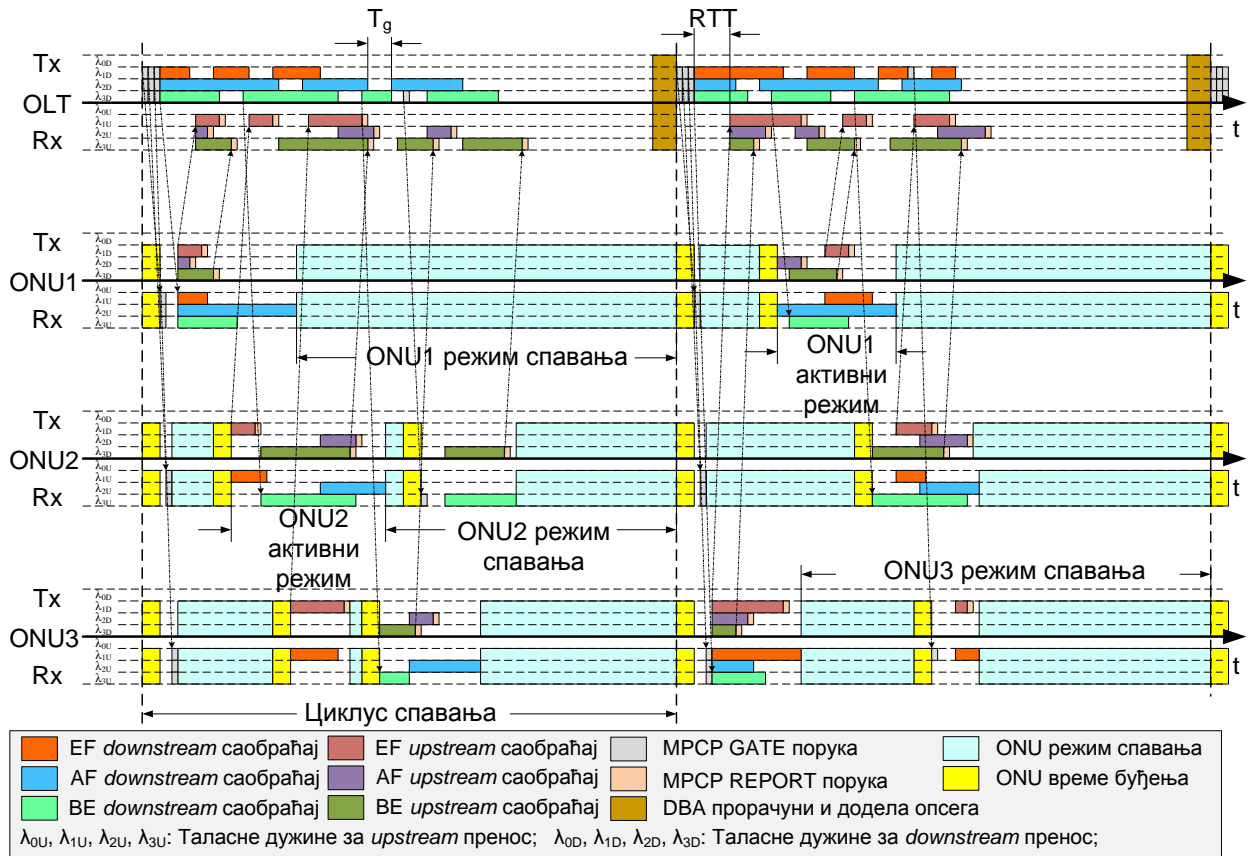
$$w_{unused}^{tc} = \frac{W_{total}^{tc\_free}}{W_{total}^{tc\_unallocated}} \quad (5.25)$$

OLT потом применом израза (5.3) у којем фигуришу информација из примљених REPORT порука и ажурираних стања својих бафера добија новозахтеване пропусне опсеге за ONU јединице које су на почетку циклуса спавања тражиле додатне капацитете за пренос. OLT им сада додатно додељује пропусне опсеге:

$$W_i^{tc\_allocated} = \begin{cases} W_i^{tc\_requested}; W_i^{tc\_requested} \leq w_{unused}^{tc} \cdot W_i^{tc\_unallocated} \\ w_{unused}^{tc} * W_i^{tc\_unallocated}; W_i^{tc\_requested} > w_{unused}^{tc} \cdot W_i^{tc\_unallocated} \end{cases} \quad (5.26)$$

$tc \in \{EF, AF, BE\}$

Сада се шаљу GATE поруке са информацијама о дужини алоцираног временског слота  $T_i^{tc\_slot}$  (добија се помоћу израза (5.12)), почетком тог временског слота  $t_i^{tc\_start\_tx}$  и трајању додатног циклуса спавања  $T_i^{tc\_sleep\_cycle\_add}$ .



Слика 5.8: Илустрација размене саобраћаја, контролних порука, алокације таласних дужина и трајања временских слотова и времена спавања ONU јединица у оквиру EE-DWPBA-ASC алгоритма за алокацију пропусног опсега

$$t_i^{tc\_start\_tx} = t^{tc\_allocated} + T_g + \sum_{j=1}^{i-1} F_j^{tc\_unallocated} (T_j^{tc\_slot} + T_g) \quad (5.27)$$

$$T_i^{tc\_sleep\_cycle\_add} = T_{cycle} - T_i^{tc\_sleep\_cycle} \quad (5.28)$$

за сваку таласну дужину,  $t_j$ . за сваку класу саобраћаја  $tc \in \{EF, AF, BE\}$ .

Илустративни приказ размене саобраћаја између OLT-а и три ONU јединице је дат на слици 5.8. У два приказана циклуса спавања две ONU јединице траже додатни пропусни опсег за пренос саобраћаја. ONU2 у првом приказаном циклусу спавања захтева додатни пропусни опсег за BE класу саобраћаја, док у другом циклусу спавања ONU3 тражи додатни пропусни опсег за EF класу саобраћаја. У примеру са слике 5.8 се види да оба корисника алоцирају додатни пропусни опсег када све остале ONU јединице заврше размену свог саобраћаја у додељеним временским слотовима унутар приказаних циклуса спавања.

### 5.5.3.3. Адаптивни циклус спавања

Променом дужине циклуса спавања можемо да утичемо на додатно унесено кашњење пакета узроковано њиховим баферисањем. Како је максимално додатно кашњење пакета мање од трајања два циклуса спавања, са смањивањем циклуса спавања када се детектује повећано стање броја пакета у баферима смањујемо и кашњење тих пакета. Конкретно, у EE-DWPBA-ASC шеми, ако је укупни захтевани пропусни опсег од свих ONU



јединица за класу саобраћаја  $tc$  већи од укупног расположивог пропусног опсега придружене таласне дужине, OLT смањује трајање циклуса спавања на минималну вредност како би се фреквентније размењивали кориснички етернет пакети из бафера и минимизовало додатно унесено кашњење пакета. Са дужином циклуса спавања такође утичемо и на уштеду енергије, јер са дужим циклусима спавања имамо да ONU јединице више времена могу да проведу у режиму спавања, што је раније описано у механизму масовног преноса. После дефинисаног броја циклуса спавања са укупним захтеваним пропусним опсегом мањим од доступног на таласној дужини, OLT повећава трајање циклуса спавања ради боље енергетске ефикасности, тј. дужег режима спавања ONU јединица. То повећање се ради у корацима све док нема повећаних захтева за пропусним опсегом и док се не достигне максимално дефинисано трајање циклуса спавања.

На почетку новог циклуса спавања OLT одређује колико ће бити трајање тог циклуса спавања. За дужину циклуса спавања може се узети једна од  $L$  вредности из  $V^{sleep\_cycle}$  скупа:

$$V^{sleep\_cycle} = [T_1, T_2, \dots, T_L] \quad (5.29)$$

при чему је:

$$T_1 < T_2 < \dots < T_L \quad (5.30)$$

Као што је већ речено, дужина циклуса спавања зависи од количине недодељеног пропусног опсега  $W_{total}^{tc\_unallocated}$  и то:

$$T_{tc}^{cycle} = \begin{cases} T_{MIN}^{cycle}; W_{total}^{tc\_unallocated} > W_{total}^{tc\_free} \\ T_{total}^{cycle}; W_{total}^{tc\_unallocated} \leq W_{total}^{tc\_free} \wedge C^{cycle} < K \\ T_{NEXT}^{cycle}(T^{cycle}); W_{total}^{tc\_unallocated} \leq W_{total}^{tc\_free} \wedge C^{cycle} = K \end{cases} \quad (5.31)$$

где је  $C^{cycle}$  бројач узастопних циклуса спавања са истом дужином трајања:

$$C^{cycle} = \begin{cases} 0; (\exists tc: W_{total}^{tc\_unallocated} > W_{total}^{tc\_free}) \vee C^{cycle} = K \\ C^{cycle} + 1; (\forall tc: W_{total}^{tc\_unallocated} \leq W_{total}^{tc\_free}) \wedge C^{cycle} < K \end{cases} \quad (5.32)$$

а  $K$  је број циклуса спавања без захтеваних пропусних опсега који су већи од доступног пропусног опсега на таласним дужинама након којег се повећава трајање циклуса спавања.  $T_{MIN}^{cycle}$  и функција  $T_{NEXT}^{cycle}(T^{cycle})$  су дефинисани као:

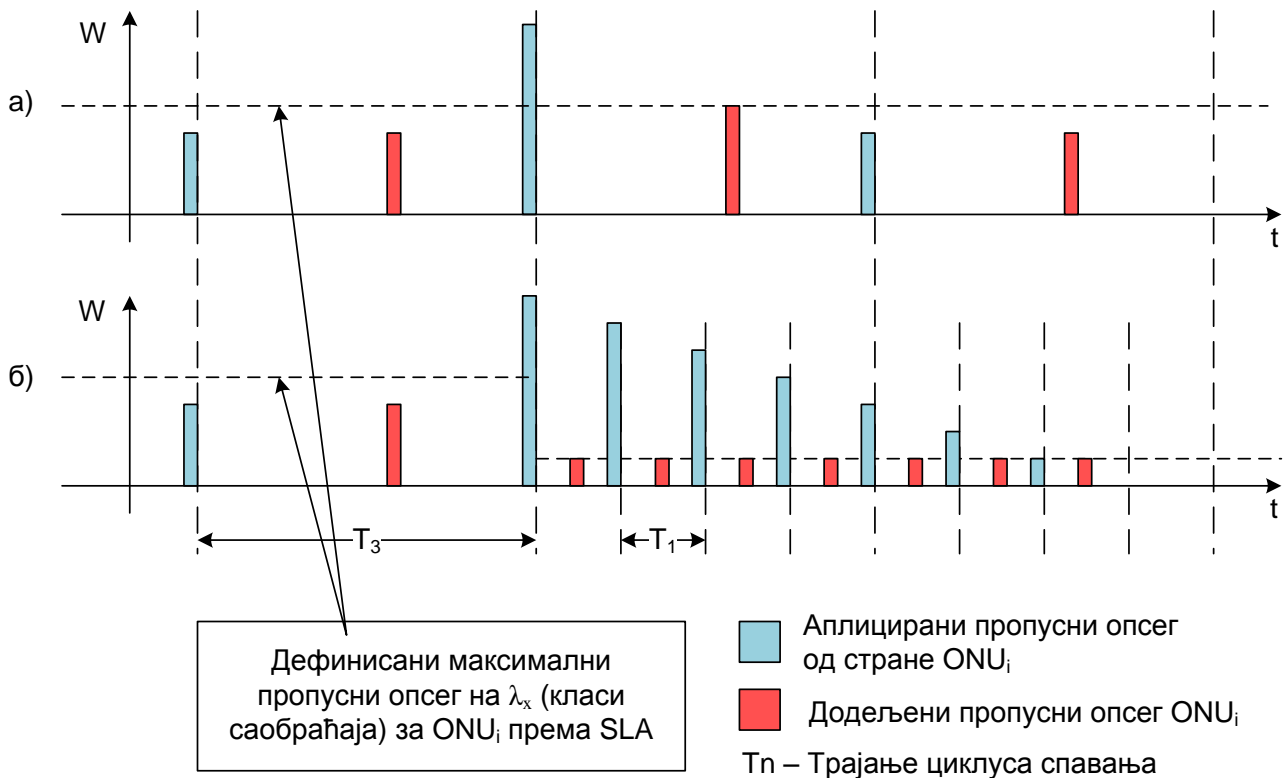
$$T_{MIN}^{cycle} = T_1$$

$$T_{NEXT}^{cycle}(x) = \begin{cases} T_2; x = T_1 \\ T_3; x = T_2 \\ \dots \\ T_L; x = T_{L-1} \vee x = T_L \end{cases} \quad (5.33)$$

На крају, дужина циклуса спавања се одређује помоћу следећег израза:

$$T^{cycle} = \min\{T_{EF}^{cycle}, T_{AF}^{cycle}, T_{BE}^{cycle}\} \quad (5.34)$$

Илустрација предности примене адаптивног циклуса спавања је приказана на слици 5.9. Горња половина слике приказује DBA алгоритам без примене адаптивног циклуса спавања. Као што се може видети са доње половине слике 5.9, када се детектује повишена оптерећеност бафера циклус спавања се смањује и кашњења пакета су мања у односу на кашњења на горњој половини слике.

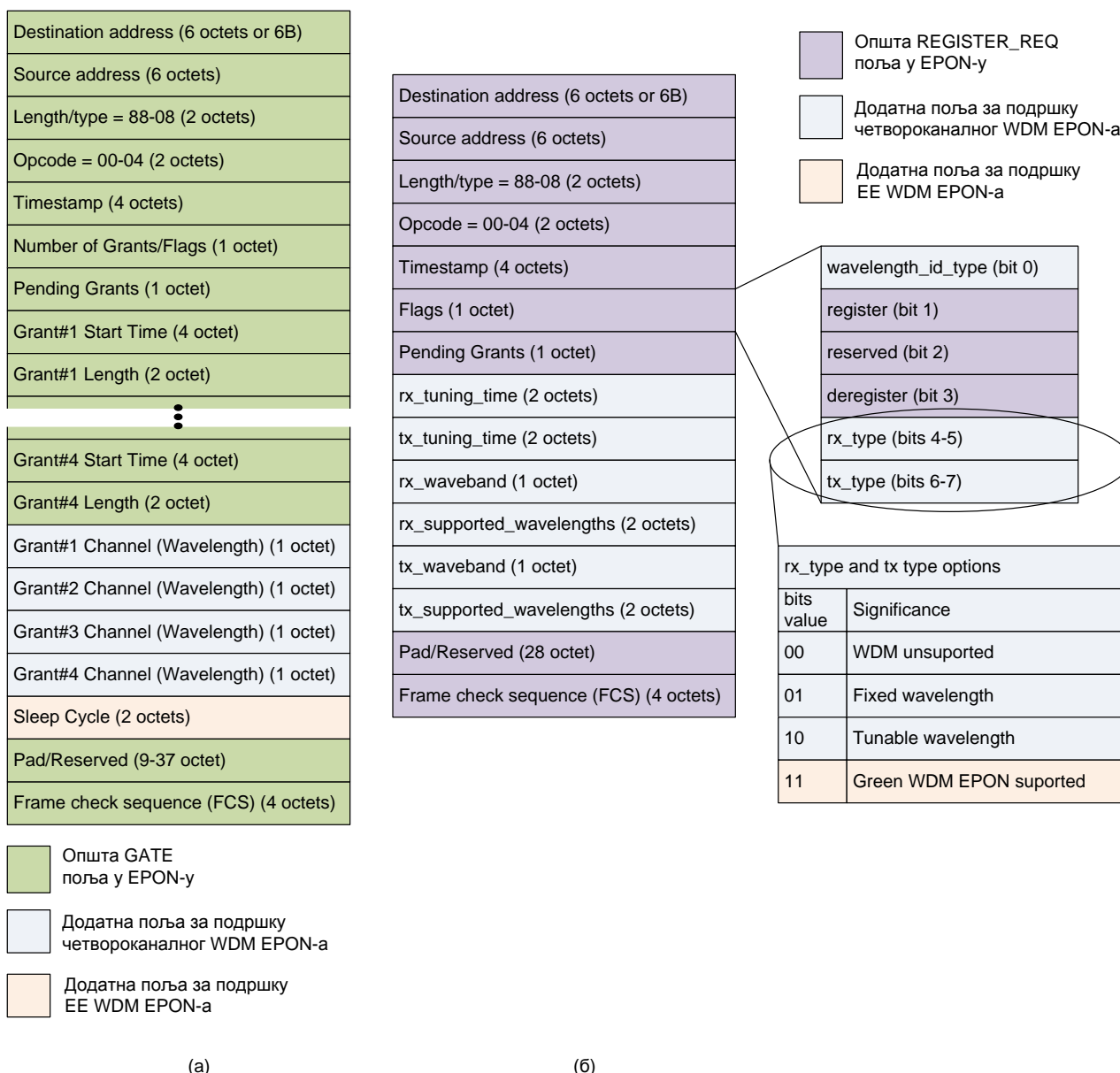


Слика 5.9: Илустрација додатно унешеног кашњења пакета узрокованог баферисањем саобраћаја ка кориснику у EE WDM EPON систему а) без адаптивног циклуса спавања и б) са адаптивним циклусом спавања

EE-DWPBA-ASC алгоритма је представљен у [32]. Аутори [32] поред описа самог алгоритма и његових *online* и *offline* делова дају и поређење перформанси у EE WDM EPON у односу на EE-DWPBA алгоритам.

## 5.6. Проширење MPCP протокола

На почетку сваког циклуса спавања OLT шаље свакој ONU информације о трајању циклуса спавања, дужини и почетку додељеног TDM прозора користећи GATE поруке. Структура измењених MPCP порука за подршку четвороканалном моделу WDM EPON-a представљена је у [7]. За EE WDM EPON потребно је прилагодити MPCP поруке како би се омогућила примена механизма за уштеду енергије [33]. Најпре OLT мора знати да ли је у ONU јединицама имплементирана подршка за примену механизма за уштеду енергије, тј. да ли архитектура ONU јединице подржавају EE WDM EPON. Даље, након успешне регистрације ONU, ако та ONU подржава механизме за уштеду енергије, OLT је мора обавестити о трајању циклуса спавања. Додатне структурне промене MPCP порука су једно додатно поље у GATE порукама које се користе за информисање ONU о трајању циклуса спавања и једно додатно поље у поруци REGISTER\_REQ за пружање информације OLT-у о подршци за EE WDM EPON у ONU. Поља *rx\_tuning\_time* и *tx\_tuning\_time* могу се користити за пружање информације о ONU периоду буђења [21]. На слици 5.10 приказане су предложене допуне GATE поруке (лева страна слике) и REGISTER\_REQ (десна страна слике). Додатно поље у GATE поруци је *Sleep cycle* (циклус спавања), док је у REGISTER\_REQ поруци промењено поље *Flags* (*rx\_type* и *tx\_type* битови) у поређењу са структурама порука у [7], где није у ONU јединицама постојала имплементирана подршка за EE WDM EPON.



Слика 5.10: Проширења структура контролних MPCP порука ради подршке EE WDM EPON систему – а) проширење GATE поруке и б) проширење REGISTER\_REQ поруке

## 5.7. Преглед објављених DBA алгоритама за уштеду енергије у PON мрежама

У овом делу се приказују карактеристични/одабрани EE DBA алгоритми који су до сада публиковани у литератури. За све њих је карактеристичан приступ коришћења или једне таласне дужине или више које се додељују једној или више ONU. Овај приступ се разликује од приступа приказаног у дисертацији у коме се таласна дужина додељује класи сервиса а не ONU јединици.

У [34] аутори су проучавали перформансе преноса саобраћаја ка кориснику у *Green EPON* мрежама у условима ограниченог понашања сервиса и временском слоту који се преклапа са слотом за пренос саобраћаја од корисника. Предложена шема заснива се на новом аналитичком моделу у којем је анализирано очекивано кашњење пакета у смеру ка кориснику и ONU време мировања у оквиру GBA (енгл. *Green Bandwidth Algorithm*)

алгоритма. Предложена шема истражује максимално време мировања ONU јединице у окружењу дефинисаним кашњењима пакета у смеру преноса ка кориснику, за које се, према ауторима, очекује да у потпуности испуњава практичне захтеве EPON мреже. Међутим, није јасно како би се то могло постићи у стварном окружењу, јер су аутори поставили идентично трајање циклуса за пренос пакета и у смеру од корисника и ка кориснику, иако је количина саобраћаја у смеру ка кориснику и даље доминантна у приступним мрежама. Штавише, симулациона анализа дефинише две саобраћајне групе – VBR саобраћај и BE саобраћај. Није јасно како би се у овом случају поступало са саобраћајем који преноси говор, који се класификује као CBR саобраћај и има најстроже QoS захтеве. Извршена анализа укључује системе до 32 ONU јединице, иако стандардни данашњи системи подразумевају најмање 64 ONU јединице.

DTB (енгл. *Downstream Burst Transmission*) алгоритам за уштеду енергије приликом обраде пакета у пријемном делу је предложен у [35]. У предложеној шеми преноса OLT организује своју предају у смеру ка кориснику груписањем пакета према томе којој су ONU јединици намењени у узастопне временске слотове и обавештава ONU јединице и DSL модеме када треба да искључе своје блокове за обраду пакета. Као резултат се постиже да ONU и DSL елементи мреже пале и гасе своје пријемне блокове по инструкцијама добијених од OLT-а. Пријемници су активни само када постоји унапред груписани саобраћај ка кориснику, а искључују се када се у смеру ка кориснику преноси саобраћај намењен другим ONU јединицама. Иако аутори закључују да укупна потрошња енергије расте како се повећава количина ONU, они пружају резултате симулације за максимална 32 ONU у једноканалној EPON мрежи. Ипак, аутори тврде да предложена шема не погоршава QoS перформансе, али нису представљени резултати симулације који то показују и аутори не уводе никакве класе саобраћаја или сегрегацију саобраћаја.

Аутори [36] предложили су SMA (енгл. *Sleep Mode Aware*) алгоритам за две врсте ONU јединица: пређашње ONU јединице – L-ONU (енгл. *Legacy ONU*) и ONU јединице следеће генерације – NG-ONU (енгл. *Next Generation ONU*). За L-ONU се узима да имају велико време буђења, док је код NG-ONU карактеристика да им је овај параметар бољи, тј. да имају значајно краће време буђења након неактивног периода. За NG-ONU јединицу аутори су предложили нову шему предикције периода спавања и четири начина доделе пропусног опсега према заузетости бафера саобраћајем ка кориснику и од корисника: UC (енгл. *Upstream Centric*), UDC (енгл. *Upstream and Downstream Centric*), VA (енгл. *Void Aware*) и MST (енгл. *Minimum Sleep Time*). Ипак, није јасно како би ова шема утицала на пренос VBR саобраћаја, јер аутори дефинишу само две класе саобраћаја - класу саобраћаја високог приоритета и класу саобраћаја ниског приоритета која укључује саобраћај и средњег и ниског приоритета (уколико нема довољно простора за баферисање саобраћаја највишег приоритета онда се пакети са малим приоритетом померају даље у редовима чекања како би се направило простора у баферима што, доводи до погоршања перформанси саобраћаја нижег приоритета). Презентоване симулације су рађене за само 16 ONU јединица, што је знатно мање у поређењу са циљним бројем корисника у EPON топологијама.

У [37] је предложен SDBA (енгл. *Sleep-aware Dynamic Bandwidth Allocation*) алгоритам за повећање енергетске ефикасности уз истовремено задовољавање корисничког QoS-а у 10G-EPON мрежама и у смеру преноса пакета ка кориснику и у смеру од корисника. SDBA максимално повећава циклус спавања како би продужио време неактивности (тј. време спавања) ONU јединице изван додељеног временског слота. Затим, на основу посматраних брзина преноса података, SDBA омогућава ONU јединици да спава и унутар свог временског слота додељивањем само неопходног пропусног опсега за пренос акумулираног саобраћаја током времена спавања и релевантних контролних порука. Иако аутори пружају експерименталну оцену представљеног алгоритма, није јасно како би тако сложена шема утицала на QoS параметре у систему који имају више од две ONU јединице

(аутори дају резултате симулације само за две ONU), јер би количина саобраћаја била знатно већа и сходно томе обрада у OLT-у била би комплекснија и захтевала више времена.

Аутори [38] предложили су енергетски ефикасну динамичку расподелу пропусног опсега EE-DBA (енгл. *Energy-Efficient Dynamic Bandwidth Allocation*) у PON-у. Предложени DBA комбинује два унапред дефинисана времена спавања: дуже и краће, звано максимално и минимално време спавања. OLT израчунава са максималним временом спавања да ли акумулирани пакети и кашњење услед времена спавања могу да задовоље ограничење заузетости бафера и кашњење пакета толерисане корисниковим QoS захтевима, а затим одлучује да ли ће дозволити активирање режима уштеде енергије. Ако заузме бафера и кашњење пакета не задовољавају QoS захтеве, OLT понавља исте прорачуне са минималним временом спавања. Ако времена спавања не задовољавају тражене критеријуме, режим уштеде енергије није дозвољен ONU јединици.

Уштеда енергије у OLT-у је предложена у [39]. Аутори су предложили да, у случају да нема саобраћаја за ONU јединицу, OLT искључи оптичку претплатничку јединицу – OSU (енгл. *Optical Subscriber Unit*) и уштеди енергију на локацији провајдера. Представљени DWA (енгл. *Dynamic Wavelength Algorithm*) алгоритам додељује двома ONU јединица да користе исту таласну дужину у сврху ослобађања некоришћене таласне дужине и смањења броја активних OSU модула у OLT-у.

У [40] је предложена енергетски ефикасна шема LASA (енгл. *Load Adaptive Sequence Arrangement*) која на основу количине саобраћаја који ONU јединице требају да размене са OLT-ом у 10G-EPON систему прави редослед по којем ће се вршити примопредаја саобраћаја са ONU јединицама. Теоријска анализа указује да распоред размене пакета по ONU јединицама има значајан утицај на енергетску ефикасност мреже. Аутори наводе да ова шема може побољшати енергетску ефикасност пасивних оптичких приступних мрежа и повећати неактивност ONU јединица до 18% без повећања трајања циклуса спавања. Наводи се да од редоследа примопредаје саобраћаја зависи време спавања ONU јединице, па тако оне којима су додељена дужа времена чекања у реду пре почетка слања/пријема саобраћаја могу да спавају много дуже. Распоред редоследа слања се контролише лабелом која се додаје у GATE/REPORT поруке и тако се свакој ONU јединици одређује време мировања. Да би оптимизовали перформансе потрошње енергије у сценарију мреже са малим оптерећењем, аутори предлажу LASA-FMT (енгл. *Fixed Minimal Transmission time*) шему. Аутори напомињу да је утицај LASA и LASA-FMT шема на кашњење пакета прихватљиво за услуге осетљиве на кашњење.

У [41] је представљен енергетски-ефикасан механизам који оптимизује број активних таласних дужина и користи режим спавања да би побољшао уштеду енергије у WDM PON мрежама које за пренос користе брзине од 10 Gb/s по таласној дужини. У предложеном механизму ONU јединице раде у оквиру максималног времена циклуса спавања које задовољава тражена кашњења пакета и у којем се постиже максимална могућа уштеда енергија. Када просечна количина пропусног опсега коју захтевају ONU јединице премаши максимално дозвољени пропусни опсег, у мрежу се уводи нова таласна дужина како би и даље била задовољена тражена кашњења. С друге стране, када је тражени пропусни опсег ONU јединица мали, неактивне таласне дужине се искључују ради повећања уштеде енергије OLT-у и ONU јединицама. Овај механизам се анализира помоћу *online* и *offline* DWBA алгоритма. Учинак оба алгоритма у [41] се анализира у смислу просечног кашњења, процента уштеде енергије на ONU јединицама и процента уштеде енергије на OLT-у. Резултати симулација у [41] показују да просечно кашњење пакета остаје испод одређеног максимално дозвољеног кашњења, у оба алгоритма, а остварене уштеде енергије на ONU јединицама су до 65% и 75% за *online* и *offline* DWBA алгоритам, респективно. Симулације архитектуре са 64 ONU јединице су показале да су у тој WDM PON мрежи за пренос саобраћаја коришћене највише три таласне дужине.

Аутори у [42] предлажу нови ONU-иницирани механизам за уштеду енергије базиран на SIEPON-у (енгл. *Service Interoperability EPON*) у којем ONU јединица израчунава трајање спавања предајника (Tx) на основу тренутног стања бафера и постављених захтева за максималним кашњењем и прослеђује га OLT-у. Потом OLT израчунава трајање спавања пријемника (Rx) ONU јединице и одлучује да ли ће ONU јединица да буде у Tx или TRx режиму спавања. Аутори [42] под Tx режимом спавања подразумевају стање ONU јединице када је искључен само њен предајник, док су у TRx режиму спавања искључени и пријемник и предајник. Резултати симулације показују да предложени механизам за уштеду енергије доприноси смањеној потрошњи до 47% и 42% у смеру преноса од корисника и ка кориснику, респективно. Симулације за 32 корисника и брзину преноса од 1 Gb/s су показале да је корисницима пружен гарантовани QoS у погледу средњег кашњења пакета, губитка пакета, пропусности и цитера.

У [43] аутори представљају три архитектуре NG-EPON на основу тога како ONU јединице деле таласне дужине у систему – SSD-PON (енгл. *Single-Scheduling Domain PON*), MSD-PON (енгл. *Multi-Scheduling Domain PON*) и WA-PON (енгл. *Wavelength-Agile PON*). У MSD-PON-у свака ONU јединица може истовремено да емитује само по једној таласној дужини у смеру преноса од корисника, а друге ONU јединице могу истовремено да емитују на различитим таласним дужинама. У SSD-PON-у свака ONU јединица мора да емитује на свим таласним дужинама у додељеном временском слоту како би се избегла колизија са другим ONU јединицама. WA-PON архитектура представља хибридну варијанту остале две, тако да се ONU јединицама за пренос може доделити једна заједничка таласна дужина по којој се пренос врши као у MSD-PON-у, или група таласних дужина где се за пренос користе принципи као у SSD-PON-у. Како аутори наводе, постојеће DWBA шеме за конвенционални EPON могу се применити на SSD-PON и MSD-PON, али не и на WA-PON. То је зато што је WA-PON нова архитектура са потпуном флексибилношћу где се једној ONU јединици може доделити флексибилан број таласних дужина, преко којих истовремено може преносити саобраћај више других ONU јединица. Због тога су у [43] предложена два нова DWBA алгоритма за управљање радом WA-PON. Анализом симулација аутори долазе до закључка да се у WA-PON архитектури могу постићи најбоље перформансе у односу на друге две архитектуре и то у погледу просечног кашњења пакета и процента одбачених пакета. У погледу уштеде енергије није било поређења за ове три архитектуре али је наведено да се додатне уштеде енергије у WA-PON, до 17%, могу остварити применом предложеног енергетски ефикасног DWBA алгоритма.

## 5.8. Резиме

Применом одабраних механизма за уштеду енергије из преднодног поглавља у четвороканални WDM EPON описан у [7] добија се енергетски ефикасан WDM EPON, тј. EE WDM EPON. Поред режима спавања имплементирани су и у овом поглављу описани масовни начин преноса, фер алгоритам за додељивање временских слотова, а притом је предложена и реорганизација преноса саобраћаја у смеру ка кориснику. FWPBA и DWPBA модели четвороканалне мреже су искоришћени као основа за добијање енергетски ефикасних DBA алгоритама – EE-FWPBA и EE-DWPBA алгоритама. Даљим унапређењем EE-DWPBA алгоритма и увођењем адаптивног циклуса спавања добија се *online* EE-DWPBA-ASC алгоритам. За сва три алгоритма је дат опис рада, математички модел расподеле пропусног опсега ONU јединицама и илустровани пример размене саобраћаја и сигнализације у мрежи. Потом је представљено проширење MPCP протокола како би се омогућила примена механизма за уштеду енергије. На крају поглавља је дат преглед објављених DBA алгоритама за уштеду енергије у PON мрежама.

## 6. Симулација ЕЕ WDM EPON мреже

Енергетски ефикасна WDM EPON мрежа симулирана је помоћу програмског језика С. Сви мрежни елементи и њихове функције (OLT, ONU јединице, OLT и ONU бафери, генератори саобраћаја, пакети, DBA алгоритми, MPCP поруке, итд.) имплементирани су у овом програмском језику у виду блокова кода. Архитектура симулиране ЕЕ WDM EPON мреже се састоји од једног OLT-а и 64 ONU јединице. Брзине преноса података у смеру ка кориснику и од корисника се подешавају као улазни параметар и могу бити 1 Gb/s или 10 Gb/s. Симулација се састоји од најмање 65 генератора саобраћаја, односно етернет пакета; по један за сваки *uplink* ка транспортној мрежи у OLT-у (OLT има један или више *uplink*-ова) и по један за сваку од 64 ONU јединице који симулирају кориснички саобраћај који генерише крајњи корисник и преноси се од тог корисника ка OLT-у. Вероватноће генерисања пакета израчунавају се на основу потребне ширине опсега сервиса за сваког корисника и укупног пропусног опсега у систему (1 Gb/s или 10 Gb/s по таласној дужини). Даље, помоћу случајног броја генерисаног предефинисаним генератором случајних бројева у програмском језику С, симулација утврђује да ли је пакет генерисан у том тренутку и ако јесте, вредност случајног броја у поређењу са израчунатим вероватноћама генерисања у који бафер ће се уписати пакет. Дакле, у симулацијама се генерисани пакет, у зависности од сервиса који га генерише, записује у одговарајући ONU или OLT бафер класе саобраћаја којој пакет припада. Оптерећење тог бафера се повећава за величину уписаног пакета. У исто време симулација проверава да ли је оптерећење бафера изнад дефинисане величине бафера. Ако је то случај, пакет је означен као одбачен. Одбачени пакети се евидентирају. Записује се и време одбацивања, величина одбаченог пакета, сервис којем је пакет припадао. Бафери се реализују употребом RAM (енгл. *Random-Access Memory*) меморије рачунара који се користи за покретање симулација, а величина бафера је ограничена на 2 МВ. Уписивање/ишчитавање пакета у/из свих бафера за сваку ONU јединицу и OLT врши се динамичком алокацијом/деалокацијом одређеног дела PC (енгл. *Personal Computer*) меморије намењене том елементу симулиране ЕЕ WDM EPON мреже. На овај начин се симулирају бафери и њихово оптерећење се прати посматрањем количине алоциране RAM меморије. *Offline* ЕЕ-FWPBA и ЕЕ-DWPBA модели су засебни блокови кода у симулацији и могуће је одабрати који ће се DBA алгоритам користити у симулацијама. *Online* DBA алгоритам са адаптивним циклусом спавања реализован је као нови блок кода (који је укључен у главни код) како би се

упоредили резултати добијени симулацијом енергетски ефикасне WDM EPON мреже у којој се користе *offline* алгоритми. У овом поглављу су најпре упоређене перформансе поменутих *offline* DBA алгоритама, а симулације су показале да употреба *offline* EE-DWPBA алгоритма даје много боље резултате. Даље, у овом поглављу су упоређени *online* DBA алгоритам са ASC и *offline* EE-DWPBA алгоритам. Поређења резултата симулација су вршена тако што су симулације покретане са истим улазним параметрима уз одабир имплементације једног од поменутих DBA алгоритама. Подесиви улазни параметри у симулацијама су, између осталог, број корисника (ONU јединица), број линкова од OLT-а ка транспортном делу мреже (енгл. *uplink*), брзина сваког *uplink*-а, брзина преноса по таласној дужини у EE WDM EPON-у, величина бафера, трајање циклуса спавања, сервиси који се пружају кориснику и потребан пропусни опсег за сваки од њих. Коришћене вредности улазних параметара су наведене у табелама 6.1 и 6.2.

Табела 6.1: Вредности улазних параметара коришћене у симулацијама EE WDM EPON система

Параметар симулације	Вредност параметра
Број ONU јединица	64 ONU
Симулирани период рада мреже	180 s
Ширина пропусног опсега по таласној дужини	1 Gb/s (10 Gb/s)
Број OLT <i>uplink</i> портова	2 <i>uplink</i> -а (2 x 1 Gb/s)
Величина нових бафера у OLT-у	5 MB
Број нових бафера у OLT-у	192 (3 x број ONU јединица)
Време буђења ONU јединице	1 ms
Заштитни временски период - $T_g$	1 $\mu$ s
Циклус спавања (сет коришћених вредности)	5 ms, 10 ms, 20 ms и 50 ms
Оптерећење мреже(коришћење доступних сервиса)	100%
Временска резолуција симулације	128 B

Временска резолуција која се користи у симулацији за мерења, прикупљање података и бројање генерисаних пакета одређује се трајањем блока бајтова. Овај параметар је такође подесив и може узимати било коју величину од 1 бајта до 128 бајтова. У симулацијама је коришћена резолуција од 128 бајта. Наиме, симулација периодично (у интервалу од 128 бајтова) проверава статус свих генератора саобраћаја, генерише пакете, уписује и ишчитава пакете из бафера блок по блок (128 бајтова по 128 бајтова), проверава и прави пресек стања бафера у OLT-у и ONU јединицама, прати тренутни број пакета у баферима, инкрементира локалне бројаче у ONU јединицама и проверава почетак и завршетак сваког додељеног временског слота за пренос података за сваку ONU јединицу, између осталог мери време спавања и активне периоде ONU јединица. Када се симулација заврши, сви прикупљени подаци (максимално оптерећење бафера за сваку класу саобраћаја, укупно време мировања ONU јединица, остварени саобраћај за сваки сервис, број пренесених пакета и бајтова за сваки сервис и сваку класу саобраћаја и алоцирани пропусни опсег у сваком циклусу спавања) се записују у излазну датотеку у облику табела. Симулације су понављане за различите вредности циклуса спавања: 5 ms, 10 ms, 20 ms и 50 ms. Период буђења симулираних ONU јединица подешен је на 1 ms, а коришћен је заштитни интервал  $T_g$  у трајању од 1  $\mu$ s [34][37].



Табела 6.2: Параметри корисничких сервиса имплементираних у симулацијама и њихова класификација по класама сервиса

Сервис	Класа саобраћаја	Пропусни опсег – ка кориснику	Пропусни опсег – од корисника	Величина пакета
<b>SDTV</b>	AF	4 Mb/s	/	1280 В
<b>HDTV</b>	AF	10 Mb/s	/	1280 В
<b>VoIP</b>	EF	100 Kb/s	100 Kb/s	320 В
<b>Видео позив/Gaming</b>	EF	2 Mb/s	2 Mb/s	640 В
<b>Video stream/VoD</b>	AF	2 Mb/s	/	640 В
<b>Email, FTP, web...</b>	BE	до 10 Mb/s	до 4 Mb/s	640 В

Симулација подржава груписање услуга у сервисне пакете који се испоручују крајњим корисницима у складу са њиховим захтевима. Сходно томе, могуће је дефинисати којем кориснику је додељен који пакет услуга. Услуге и пакети услуга коришћени у симулацијама заједно са њиховим карактеристикама (вредностима параметара који их дефинишу) приказани су у табели 6.3. Пакети услуга су креирани тако да представљају типичне захтеве крајњих корисника и актуелне понуде тренутних сервис провајдера. Услуге које се користе у симулацијама су телевизија стандардне резолуције – SDTV (енгл. *Standard Definition Television*), телевизија високе резолуције HDTV (енгл. *High Definition Television*), пренос гласа преко интернета – VoIP (енгл. *Voice over Internet Protocol*), конференцијски видео позиви, видео на захтев – VoD (енгл. *Video on Demand*), видео стриминг (енгл. *Video Streaming*), стриминг уживо (енгл. *Live Streaming*), играње видео игара (енгл. *Gaming*) и широкопојасни приступ интернету. VoIP и фиксна телефонија, тј. PSTN (енгл. *Public Switched Telephone Network*), су класификовани као EF класа, класа саобраћаја највишег приоритета за саобраћај осетљив на кашњење са константном брзином преноса. Због све строжих захтева по питању кашњења и интерактивни сервис у реалном времену, као што су *Gaming* и видео конференције, се могу класификовати као EF саобраћај. SDTV, HDTV, преноси уживо и VoD класификовани су као AF класа саобраћаја, тј. класа средњег приоритета. BE класа саобраћаја је класа са ниским приоритетом за услуге које не захтевају никакве гаранције у погледу кашњења, варијације кашњења и пропусног опсега. У ову класу се сврставају сервиси као што су пренос датотека, прегледање веб страница, коришћење података из облака, апликације за дописивање (енгл. *Chat and Instant messaging application*), као и апликације за размену електронске поште. Претпоставља се да се највећи број корисника претплаћује на основни пакет услуга, попут једног SDTV канала, једне телефонске линије и широкопојасног приступа интернету. Пакет услуга за напреднијим, бројнијим и захтевнијим услугама, попут већег броја HDTV канала, VoD, или бржег широкопојасног приступа интернету, додељују се мањем броју корисника.

Табела 6.3: Пакети сервиса дефинисани у симулацијама и сервиси унутар њих

Сервис	Пакет сервиса #1	Пакет сервиса #2	Пакет сервиса #3
<b>SDTV</b>	1 канал	/	1 канал
<b>HDTV</b>	/	1 канал	1 канал
<b>VoIP</b>	1 линија	1 линија	1 линија
<b>Видео позив/Gaming</b>	1 линија/игра	1 линија/игра	1 линија/игра
<b>Video stream/VoD</b>	1 видео	1 видео	1 видео
<b>Email, FTP, web...</b>	3/1 MB/s	6/2 MB/s	10/4 MB/s
<b>Број корисника</b>	55	7	2

Прављењем преноса ка кориснику да буде TDM природе и додавањем бафера у OLT-у се теоретски уноси додатно кашњење пакета од максимално два трајања циклуса спавања. Резултати симулације показују да је максимално додатно унесено кашњење пакета мање од те вредности, док је просечно кашњење пакета испод трајања циклуса спавања. Доминантни део кашњења пакета приликом преноса од једног до другог корисника је обрада пакета у приступној мрежи (ивични рутери и уређаји крајњих корисника), док је кашњење кроз транспортну оптичку мрежу углавном пропагационо кашњење сигнала. Резултати симулације показују да су добијена додатна кашњења пакета у EE WDM EPON приступној мрежи много мања од QoS захтеваних максималних кашњења и џитера и да су сви сервиси остварили захтеване пропусне опсеге. EtherSAM, односно ITU-T Y.1564, [44] је ITU-T методологија за испитивање етернет сервиса приликом активације, али је уједно и стандард за проверу подешавања, инсталирање и отклањања проблема етернет сервиса. EtherSAM је једина стандардна методологија испитивања која омогућава потпуну валидацију етернет SLA уговора о квалитету услуге у једном брзом тесту и са највишим нивоом тачности. EtherSAM дефинише четири кључна индикатора перформанси – KPI (енгл. *Key Performance Indicators*): пропусност, губитак пакета, кашњење пакета и варијација кашњења пакета [44]. У представљеним симулацијама EE WDM EPON архитектуре сва четири KPI су испуњена за све сервисе.

VoIP/PSTN саобраћај је класификован као EF класа саобраћаја, класа највишег приоритета за сервисе осетљиве на кашњење и са константном брзином преноса [7]. Латенција је временско кашњење при преносу гласовних пакета од изворишта до одредишта. ITU-T G.114 [45] препоручује максималну латенцију од 150 ms за VoIP, и генерално мерења не би требало да пређу ову вредност како би се спречило нарушавање квалитета позива. Џитер, односно варијација кашњења, се може мерити на неколико начина, али произвођачи опреме и мреже често не наводе тачно како израчунавају и мере вредност коју пријављују за измерени џитер. Већина VoIP уређаја код крајњих корисника (нпр. VoIP телефони и АТА (Аналоги Терминални Адаптер)) имају џитер бафере како би компензовали варијацију кашњења пакета кроз мрежу. Џитер бафери додатно повећавају кашњење пакета од изворишта до одредишта и обично су ефикасни само код варијација кашњења мањих од 100 ms. Због тога џитер мора бити минимизован. У ову класу саобраћаја, са истим захтевима за кашњењем и варијацијом кашњења, могу се сврстати и интерактивни сервиси као што су конференцијски позиви, видео конференције и *gaming*.

SDTV, HDTV, преноси уживо и видео на захтев (VoD) класификовани су као AF класа саобраћаја, тј. класа средњег приоритета [7]. Услуга преноса уживо има сличне захтеве за кашњењем и варијацијом кашњења као и услуге у реалном времену, као што је VoIP, с тим што ови сервиси нису интерактивни па корисник повећано кашњење не може субјективно да перципира. SDTV и HDTV сервиси имају опште понашање да када се уведе кашњење или џитер од  $X$  ms, репродукција слике се замрзне на  $X$  ms, па се потом наставља без већих проблема. Кашњење и џитер мањи од 100 ms нису проблематични за репродукцију и корисник нема проблеме при гледању садржаја. Такође, како Сет-топ-бокс, скраћено STB (енгл. *Set-Top Box*) повећава током рада дубину свог адаптивног бафера, појава џитера уопште не ствара проблеме у репродукцији. Неки STB уређаји уопште немају нарушену репродукцију чак ни са кашњењем/џитером од 1 s на HDTV каналу. Разлог би могао бити то што ти STB од почетка рада користе велики бафер. За друге STB уређаје кашњење/џитер преко 700 ms проузрокују аудио грешке (гличеве), а на 1000 ms звук једноставно нестане. Сви STB би требало да буду у стању да компензују кашњење/џитер од најмање 200 ms.

BE класа саобраћаја је класа ниског приоритета за сервисе који толеришу пакетска кашњења и које не захтевају никакве гаранције у погледу варијације кашњења и пропусног опсега [7]. Сервиси *Internet download* и *Internet upload* у симулацијама су класификовани као BE класа, а апликације као што су веб претраживање, пренос датотека и размена електронске поште се групишу у ове сервисе.

## 6.1. Резултати симулација EE WDM EPON мреже са EE-FWPBA алгоритмом

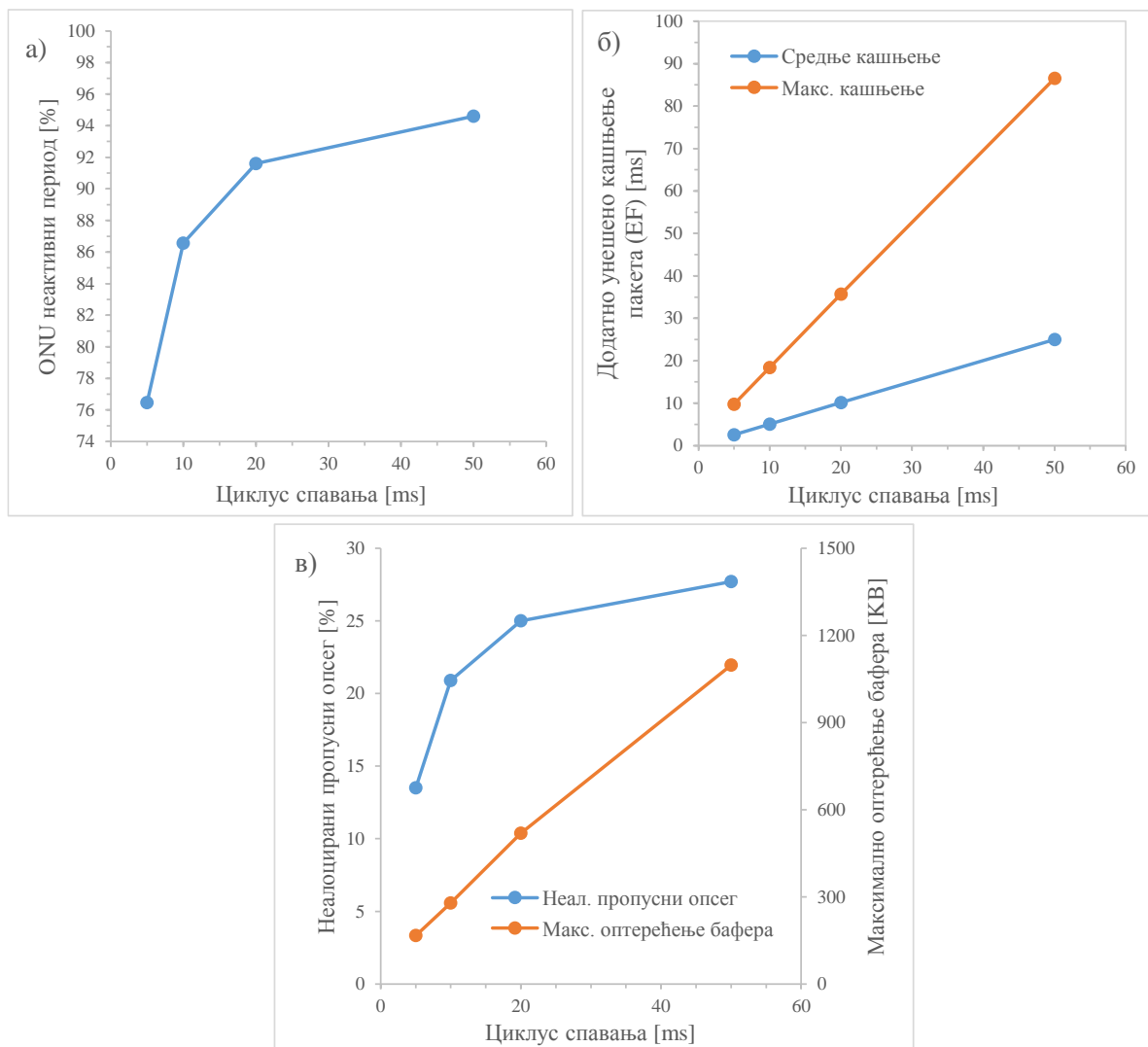
У табели 6.4 су приказани резултати симулација EE WDM EPON-а у којем је имплементиран EE-FWPBA алгоритам, а добијени за различите вредности трајања циклуса спавања. Ти резултати су заузетост бафера у OLT-у, неактивно време ONU јединица, неалоцирани пропусни опсег и средње и максимално додатно унесено кашњење пакета баферисаних у OLT-у. Потребно је напоменути да су пакети сервиса који се пружају корисницима у симулацијама, а приказани у табели 6.3, одабрани тако да систем буде што више оптерећен приликом истовременог активног коришћења свих сервиса од стране свих корисника. На слици 6.1 су графички приказани резултати наведени у табели 6.4 ради лакшег поређења за различите вредности циклуса спавања.

Табела 6.4: Резултати симулација EE WDM EPON система са EE-FWPBA алгоритмом

Циклус спавања [ms]	Минимална неактивност ONU јединице [%]	Неалоцирани пропусни опсег [%]			Додатно кашњење пакета (EF) [ms]		Максимална заузетост бафера [KB]
		EF	AF	BE	Средње	Макс.	
5	76.470	13.5	13.5	13.5	2.525	9.737	167
10	86.559	20.9	20.9	20.9	5.056	18.369	279
20	91.610	25.0	25.0	25.0	10.152	35.722	519
50	94.603	27.7	27.7	27.7	25.011	86.564	1098

Симулације су показале да су сви сервиси добили захтевани пропусни опсег, тј. није било одбацивања пакета и деградације сервиса у погледу количине пренетих података (пропусност је била 100%). Симулације потврђују да увођење циклуса спавања омогућава контролу унесеног кашњења пакета и ефикасну QoS подршку. Са слике 6.1 б) се може закључити да постоји линеарна веза између додатно унесеног кашњења пакета и дужине трајања циклуса спавања. Смањивање количине пропусне опсега потребног за пренос саобраћаја са повећањем дужине трајања циклуса спавања је директна последица масовног начина преноса описаног у 5.3.

У табелама 6.5, 6.6, 6.7 и 6.8 су приказани резултати добијени за кориснике различитих пакета сервиса и за различите циклусе спавања. Како су резултати за кориснике истих пакета сервиса готово идентични у табелама су приказани одабрани корисници тако да се прикажу резултати за сервисе различитих пакета. Тако резултати за ONU#2 и ONU#61 одговарају пакету сервиса #2 из табеле 6.3, корисник ONU#44 користи пакет сервиса # 3, а остали корисници у табелама су у симулацијама претплаћени на основни пакет услуга # 1.



Слика 6.1: Приказ резултата добијених симулацијама EE-FWPBA алгоритма у зависности од циклуса спавања: а) минимално време спавања ONU јединица, б) средње и максимално додатно унешено кашњење пакета у смеру ка кориснику и в) неалоцирани пропусни опсег у систему и максимална заузетост неког од нових бафера у OLT-у

Табела 6.5: Резултати симулација EE-FWPBA алгоритма разврстани по сервисима одабраних корисника за циклус спавања 5 ms

ONU\сервис		SDTV		HDTV		VoIP/PSTN		Видео позив		VoD/Video Stream		BE саобраћај	
#	Време спавања [%]	Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]	
		ср.	макс.	ср.	макс.	ср.	макс.	ср.	макс.	ср.	макс.	ср.	макс.
1	78.913	2.581	9.606	/	/	2.448	9.360	2.501	9.441	/	/	2.512	9.604
2	77.380	/	/	2.489	9.449	2.417	9.351	2.408	9.309	2.475	9.326	2.425	9.336
3	78.914	2.582	9.626	/	/	2.489	9.491	2.493	9.452	/	/	2.517	9.600
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
43	78.919	2.570	9.550	/	/	2.475	9.425	2.491	9.596	/	/	2.511	9.507
44	76.470	2.433	9.355	2.427	9.363	2.357	9.142	2.361	9.303	2.428	9.221	2.393	9.495
45	78.918	2.577	9.560	/	/	2.490	9.235	2.506	9.424	/	/	2.509	9.637
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
61	77.372	/	/	2.492	9.434	2.420	9.072	2.407	9.437	2.469	9.419	2.422	9.407
62	78.910	2.572	9.444	/	/	2.511	9.590	2.499	9.551	/	/	2.500	9.635
63	78.914	2.573	9.655	/	/	2.485	9.221	2.493	9.467	/	/	2.512	9.750
64	78.918	2.578	9.405	/	/	2.475	9.412	2.499	9.682	/	/	2.512	9.522

Табела 6.6: Резултати симулација ЕЕ-FWPBA алгоритма разврстани по сервисима одабраних корисника за циклус спавања 10 ms

ONU\сервис		SDTV		HDTV		VoIP/PSTN		Видео позив		VoD/Video Stream		ВЕ саобраћај	
#	Време спавања [%]	Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]	
		ср.	макс.	ср.	макс.	ср.	макс.	ср.	макс.	ср.	макс.	ср.	макс.
1	89.022	5.024	18.324	/	/	4.980	17.750	4.964	18.463	/	/	4.995	18.491
2	87.443	/	/	4.885	18.139	4.783	17.783	4.813	17.937	4.874	17.883	4.817	18.017
3	89.022	5.025	18.081	/	/	4.942	17.917	4.982	18.237	/	/	4.984	18.051
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
43	89.021	5.018	18.230	/	/	4.994	17.637	4.979	18.337	/	/	4.973	18.204
44	86.568	4.803	17.653	4.811	17.846	4.772	17.323	4.711	17.505	4.817	17.570	4.770	17.811
45	89.025	5.049	18.051	/	/	4.975	17.709	4.979	18.162	/	/	4.957	18.330
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
61	87.428	/	/	4.887	17.984	4.776	17.201	4.810	17.916	4.891	17.743	4.822	17.852
62	89.023	5.034	18.141	/	/	4.894	18.208	4.978	18.167	/	/	4.995	18.265
63	89.021	5.011	18.117	/	/	4.987	18.053	4.955	18.305	/	/	4.978	18.197
64	89.027	5.043	18.128	/	/	4.946	17.641	4.962	18.219	/	/	4.975	18.330

Табела 6.7: Резултати симулација ЕЕ-FWPBA алгоритма разврстани по сервисима одабраних корисника за циклус спавања 20 ms

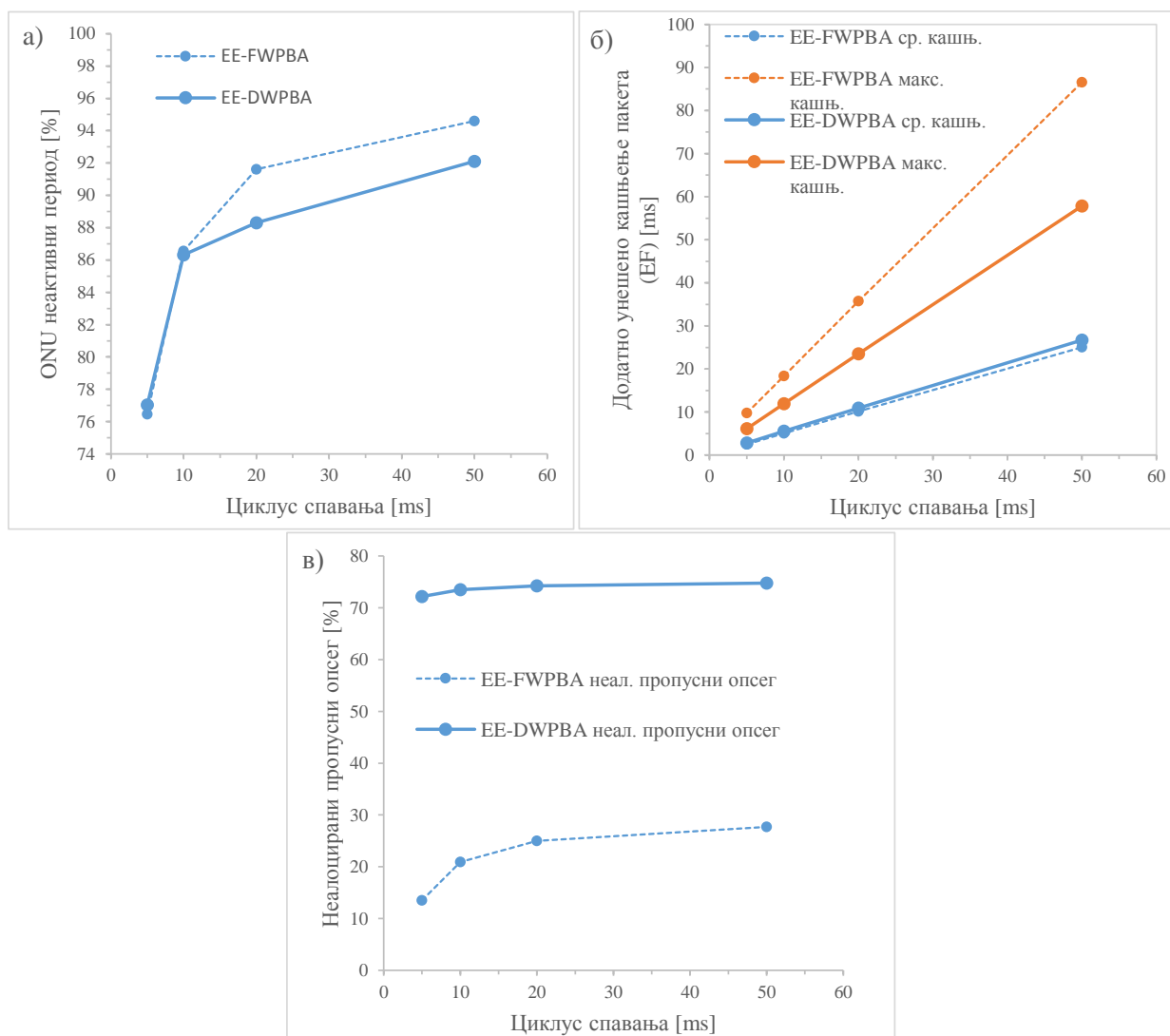
ONU\сервис		SDTV		HDTV		VoIP/PSTN		Видео позив		VoD/Video Stream		ВЕ саобраћај	
#	Време спавања [%]	Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]	
		ср.	макс.	ср.	макс.	ср.	макс.	ср.	макс.	ср.	макс.	ср.	макс.
1	94.094	10.014	35.116	/	/	10.026	34.647	9.921	35.087	/	/	9.991	35.095
2	92.459	/	/	9.722	34.495	9.590	34.081	9.592	34.516	9.669	34.375	9.647	34.714
3	94.089	9.972	35.060	/	/	9.779	34.036	9.948	35.255	/	/	9.933	35.112
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
43	94.093	10.007	35.744	/	/	9.908	34.790	9.976	35.556	/	/	9.924	35.537
44	91.610	9.565	34.613	9.579	34.371	9.425	33.757	9.444	34.394	9.566	34.519	9.510	34.522
45	94.089	9.965	34.852	/	/	9.959	34.491	9.943	35.200	/	/	9.949	35.135
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
61	92.449	/	/	9.711	34.587	9.513	34.004	9.582	34.241	9.677	34.725	9.641	34.647
62	94.092	9.983	35.119	/	/	9.852	34.333	9.935	34.850	/	/	9.936	35.095
63	94.090	9.977	35.163	/	/	9.970	34.541	9.902	35.044	/	/	9.951	35.346
64	94.087	10.001	35.679	/	/	9.842	35.039	9.944	35.047	/	/	9.882	35.244

Табела 6.8: Резултати симулација ЕЕ-FWPBA алгоритма разврстани по сервисима одабраних корисника за циклус спавања 50 ms

ONU\сервис		SDTV		HDTV		VoIP/PSTN		Видео позив		VoD/Video Stream		ВЕ саобраћај	
#	Време спавања [%]	Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]	
		ср.	макс.	ср.	макс.	ср.	макс.	ср.	макс.	ср.	макс.	ср.	макс.
1	97.134	24.841	86.222	/	/	24.881	85.673	24.835	86.133	/	/	24.760	85.743
2	95.463	/	/	24.152	84.836	23.972	83.580	24.014	84.064	24.221	84.604	24.009	84.734
3	97.135	24.922	86.353	/	/	24.826	85.917	24.671	86.105	/	/	24.783	86.881
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
43	97.135	24.839	86.797	/	/	24.610	85.012	24.704	86.388	/	/	24.722	86.696
44	94.603	23.861	83.701	23.810	83.712	23.452	82.990	23.459	83.268	23.799	83.230	23.720	83.531
45	97.135	24.826	86.098	/	/	24.634	85.298	24.697	86.411	/	/	24.859	86.496
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
61	95.460	/	/	24.205	84.575	23.805	83.112	23.954	85.050	24.277	84.893	24.005	85.082
62	97.139	24.921	86.501	/	/	24.771	84.882	24.750	86.184	/	/	24.819	86.770
63	97.137	24.812	86.757	/	/	24.920	84.797	24.676	85.837	/	/	24.778	86.747
64	97.136	24.798	86.252	/	/	24.890	86.303	24.773	86.117	/	/	24.742	86.468

## 6.2. Резултати симулација ЕЕ WDM EPON мреже са ЕЕ-DWPBA алгоритмом

Симулације ЕЕ WDM EPON система са имплементираним ЕЕ-DWPBA алгоритмом описаним у 5.5.2 су покретане са истим улазним параметрима (датим у табели 6.1) и сервисима (приказаним у табелама 6.2 и 6.3) као и симулације за ЕЕ-FWPBA алгоритам. Резултати симулација показују да се максимално унесено кашњење пакета и алоцирани пропусни опсег од стране алгоритма за пренос саобраћаја смањују у односу на вредности добијене симулацијама за ЕЕ-FWPBA алгоритам. Ради даљег поређења, резултати симулација ЕЕ-FWPBA и ЕЕ-DWPBA модела су приказани заједно на слици 6.2. Слика 6.2 приказује остварене неактивне периоде ONU јединица, додатно унесена кашњења пакета због баферисања у OLT-у и количину неалоцираног пропусног опсега система за различите вредности трајања циклуса спавања. Независно додељивање пропусног опсега за сваку класу саобраћаја смањује количину неактивног периода ONU јединице током циклуса спавања. Ово је очекивано понашање; временски слотови за различите таласне дужине више нису синхронизовани и примопредајници не раде истовремено. У ЕЕ-FWPBA моделу све таласне дужине имају исти део неискоришћене пропусне ширине. Ово је последица јединственог временског слота додељеног за све три таласне дужине. Имплементацијом истих механизма за уштеду енергије у ЕЕ-DWPBA моделу имамо смањење неактивног времена ONU јединице, тј. другим речима мању уштеду енергије, али је неалоцирани пропусни опсег, тј. ресурс који се може додатно искористити, значајно повећан у поређењу са резултатима симулације ЕЕ-FWPBA модела. Такође, у ЕЕ-DWPBA моделу мреже максимална додатна кашњења пакета узрокована новим баферима у OLT-у су знатно мања у поређењу са ЕЕ-FWPBA моделом. За временски осетљиве услуге, тј. за EF класу саобраћаја, максимално додатно унесено кашњење пакета је мало веће од трајања циклуса спавања (теоретски максимално унесено кашњење једнако трајању два циклуса спавања), што је знатно мање од резултата за ЕЕ-FWPBA модел. Средње кашњење пакета је остало слично. То показује да су сада разлике у кашњењу пакета знатно мање. Већина пакета сада има додатно кашњење мање од трајања циклуса спавања са псеудо равномерном расподелом. У ЕЕ-FWPBA моделу



Слика 6.2: Приказ резултата добијених симулацијама EE-DWPBA алгоритма у зависности од циклуса спавања: а) минимално време спавања ONU јединица, б) средње и максимално додатно унешено кашњење пакета у смеру ка кориснику и в) неалоцирани пропусни опсег у систему

већина пакета је имала додатна кашњења мања од једног циклуса спавања, али постојао је и значајан број пакета са кашњењем већим од једног трајања циклуса спавања, до скоро 2 циклуса спавања. То узрокује већи цитер, који мора бити што мањи за временски осетљиве сервисе попут VoIP-а или видео конференције. У табелама 6.9, 6.10, 6.11, 6.12 и 6.13 су приказани резултати добијени за кориснике различитих пакета сервиса и за различите циклусе спавања.

Табела 6.9: Резултати симулација EE WDM EPON система са EE-DWPBA алгоритмом

Циклус спавања [ms]	Минимална неактивност ONU јединице [%]	Неалоцирани пропусни опсег [%]			Додатно кашњење пакета (EF) [ms]		Максимална заузетост бафера [KB]
		EF	AF	BE	Средње	Макс.	
5	77.037	79.9	62.8	73.8	2.817	6.154	157
10	86.325	82.0	63.6	75.0	5.546	11.912	253
20	88.312	83.3	64.0	75.5	10.914	23.517	468
50	92.114	84.4	64.2	75.8	26.670	57.825	922

Табела 6.10: Резултати симулација ЕЕ-DWPBA алгоритма разврстани по сервисима одабраних корисника за циклус спавања 5 ms

ONU\сервис		SDTV		HDTV		VoIP/PSTN		Видео позив		VoD/Video Stream		ВЕ саобраћај	
#	Време спавања [%]	Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]	
		ср.	макс.	ср.	макс.	ср.	макс.	ср.	макс.	ср.	макс.	ср.	макс.
1	78.980	3.430	7.540	/	/	2.779	6.023	2.818	6.086	/	/	3.080	8.724
2	77.861	/	/	3.428	7.114	2.798	6.006	2.815	6.045	3.424	7.014	3.107	6.461
3	78.967	3.439	8.308	/	/	2.787	5.998	2.815	6.056	/	/	3.090	6.519
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
43	78.983	3.400	7.662	/	/	2.817	5.959	2.807	6.091	/	/	3.078	6.753
44	77.063	3.435	7.085	3.434	7.118	2.791	6.028	2.822	6.063	3.439	7.045	3.106	6.417
45	78.963	3.467	7.158	/	/	2.789	6.043	2.819	6.134	/	/	3.097	7.001
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
61	77.865	/	/	3.418	7.098	2.778	6.005	2.808	6.108	3.410	7.002	3.107	6.473
62	78.971	3.429	7.709	/	/	2.760	6.125	2.820	6.160	/	/	3.082	6.390
63	78.975	3.414	8.460	/	/	2.797	5.980	2.807	6.104	/	/	3.086	7.483
64	78.980	3.421	7.081	/	/	2.792	6.001	2.805	6.055	/	/	3.079	7.894

Табела 6.11: Резултати симулација ЕЕ-DWPBA алгоритма разврстани по сервисима одабраних корисника за циклус спавања 10 ms

ONU\сервис		SDTV		HDTV		VoIP/PSTN		Видео позив		VoD/Video Stream		ВЕ саобраћај	
#	Време спавања [%]	Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]	
		ср.	макс.	ср.	макс.	ср.	макс.	ср.	макс.	ср.	макс.	ср.	макс.
1	88.041	6.759	13.792	/	/	5.484	11.880	5.535	11.886	/	/	6.140	12.587
2	87.119	/	/	6.803	13.796	5.432	11.867	5.514	11.907	6.814	13.841	6.206	12.634
3	87.817	6.829	13.897	/	/	5.434	11.778	5.543	11.850	/	/	6.157	14.669
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
43	87.864	6.771	13.788	/	/	5.419	11.738	5.520	11.862	/	/	6.139	12.588
44	86.333	6.837	13.683	6.830	13.718	5.441	11.813	5.524	11.896	6.817	13.692	6.223	12.592
45	87.591	6.885	13.829	/	/	5.479	11.833	5.507	11.903	/	/	6.180	12.618
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
61	87.154	/	/	6.784	13.791	5.473	11.810	5.506	11.902	6.793	13.728	6.196	12.538
62	87.897	6.817	13.963	/	/	5.484	11.759	5.519	11.870	/	/	6.158	12.703
63	87.947	6.801	13.961	/	/	5.424	11.727	5.512	11.939	/	/	6.157	12.670
64	87.996	10.278	46.464	/	/	5.425	11.761	5.507	11.893	/	/	6.141	12.576



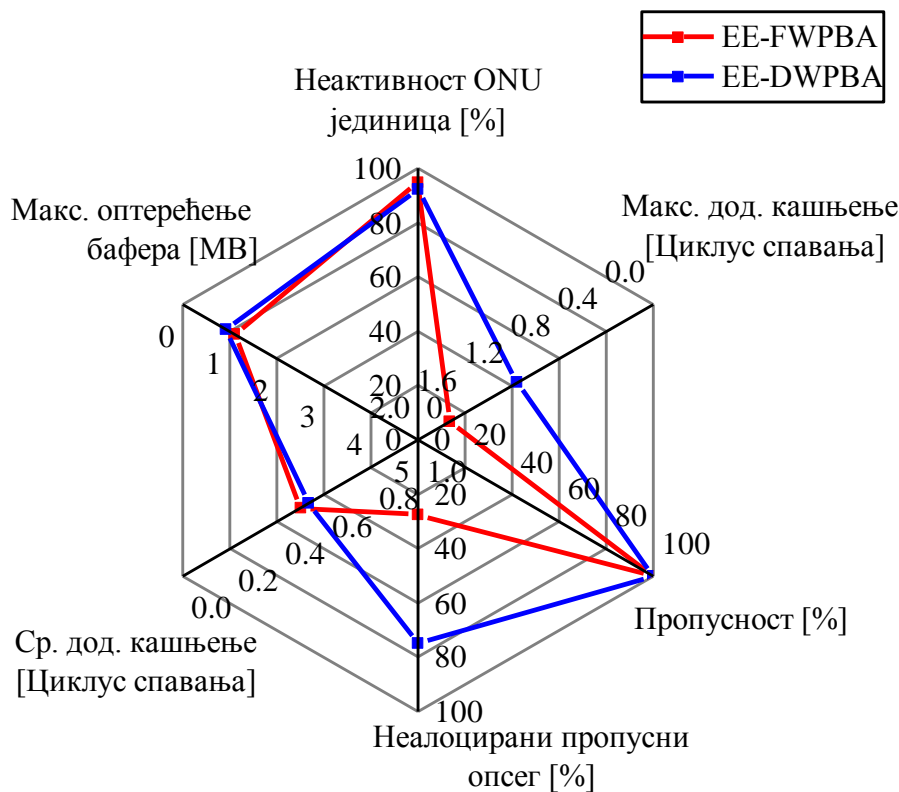
Табела 6.12: Резултати симулација ЕЕ-DWPBA алгоритма разврстани по сервисима одабраних корисника за циклус спавања 20 ms

ONU\сервис		SDTV		HDTV		VoIP/PSTN		Видео позив		VoD/Video Stream		ВЕ саобраћај	
#	Време спавања [%]	Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]	
		ср.	макс.	ср.	макс.	ср.	макс.	ср.	макс.	ср.	макс.	ср.	макс.
1	90.148	13.521	27.384	/	/	10.792	23.138	10.840	23.340	/	/	12.328	25.004
2	89.222	/	/	13.550	27.191	10.649	23.413	10.844	23.389	13.563	27.226	12.394	25.032
3	89.817	13.639	27.234	/	/	10.719	23.199	10.826	23.304	/	/	12.387	25.003
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
43	90.142	13.460	27.347	/	/	10.696	23.187	10.825	23.367	/	/	12.294	24.876
44	88.598	13.577	27.163	13.574	27.053	10.727	23.295	10.872	23.406	13.547	27.101	12.415	24.866
45	89.628	13.700	27.385	/	/	10.717	23.254	10.887	23.538	/	/	12.419	24.994
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
61	89.373	/	/	13.534	27.458	10.669	23.301	10.870	23.322	13.530	27.239	12.409	25.059
62	89.955	13.577	27.363	/	/	10.737	23.201	10.822	23.520	/	/	12.348	24.880
63	90.035	13.553	27.482	/	/	10.792	23.221	10.864	23.390	/	/	12.344	24.987
64	90.082	13.514	27.632	/	/	10.653	23.231	10.811	23.336	/	/	12.290	24.984

Табела 6.13: Резултати симулација ЕЕ-DWPBA алгоритма разврстани по сервисима одабраних корисника за циклус спавања 50 ms

ONU\сервис		SDTV		HDTV		VoIP/PSTN		Видео позив		VoD/Video Stream		ВЕ саобраћај	
#	Време спавања [%]	Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]		Дод. кашњење [ms]	
		ср.	макс.	ср.	макс.	ср.	макс.	ср.	макс.	ср.	макс.	ср.	макс.
1	94.054	33.602	67.957	/	/	26.340	57.562	26.598	57.767	/	/	30.852	62.215
2	93.018	/	/	33.773	67.954	26.516	57.307	26.704	57.666	33.750	67.530	30.872	62.047
3	93.934	33.993	67.927	/	/	26.197	57.575	26.651	57.693	/	/	30.909	62.281
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
43	94.108	33.572	67.589	/	/	26.291	57.524	26.573	57.913	/	/	30.723	62.012
44	92.310	33.757	67.312	33.835	67.520	26.431	57.489	26.568	57.846	33.916	67.269	30.952	61.771
45	93.858	34.056	68.063	/	/	26.266	57.391	26.387	57.654	/	/	31.182	62.016
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
61	93.012	/	/	33.678	67.890	26.463	57.564	26.615	57.807	33.602	67.718	30.925	62.110
62	93.975	33.826	68.012	/	/	26.290	57.366	26.504	57.816	/	/	31.008	62.250
63	93.999	33.758	68.222	/	/	26.257	57.673	26.570	57.768	/	/	30.936	62.212
64	94.029	33.709	68.187	/	/	26.635	57.633	26.574	57.882	/	/	30.816	62.192

Како симулирани модели при међусобном поређењу немају резултате свих параметара боље у односу на други модел, потребно је урадити поређење у који су укључени истовремено сви параметри од интереса. У ту сврху је формиран идеални модел ЕЕ WDM EPON система који ће служити као референтни модел за мерење (тј. оцењивање) симулираних модела преко површине коју на заједничком графикону формирају вредности параметара којима поредимо симулиране моделе. У случају идеалног ЕЕ WDM EPON система, код којег имамо максималну пропусност без додатно унесеног кашњења пакета, уз минималну алокацију пропусног опсега и минимално оптерећење бафера док је ONU јединица максимално



Слика 6.3: Заједнички приказ резултата симулација EE WDM EPON система у виду хексагона ради лакшег поређења укупних перформанси EE-FWPBA и EE-DWPBA алгорита

неактивна, површина формираног правилног шестоугла би била вредности 1. Мера квалитета симулираних модела је површина шестоугаоне фигуре која се формира повезивањем вредности добијених симулацијом (слика 6.3) и скалирана према идеалном моделу. Површина добијена за EE-FWPBA модел EE WDM EPON мреже износи 0.31, док површина EE-DWPBA модела износи 0.40. Као закључак, укупна ефикасност симулираног EE-DWPBA модела је знатно већа од ефикасности EE-FWPBA модела. Поред приказаних КРИ вредности, на квалитет услуге утиче и варијација кашњења пакета. Временски осетљиве услуге, као што је VoIP, не толеришу велике варијације кашњења пакета које могу довести до одбацивања пакета и деградације услуге сервиса које корисник може лако да примети.

Као закључак имамо да EE-DWPBA алгорита доприноси побољшању укупних перформанси EE WDM EPON система у односу на EE-FWPBA алгорита.

### 6.3. Резултат симулација EE WDM EPON мреже са EE-DWPBA-ASC алгорита

EE-DWPBA-ASC алгорита активира своје механизме за промену трајања циклуса спавања када се детектује повишено оптерећење мреже. Како би се изазвало то повишено оптерећење није довољно да сви корисници користе све своје сервисе из табела 6.2 и 6.3, већ се сваком кориснику додаје још сервиса како би се алоцирани пропусни опсег потребан за пренос свих сервиса повећао до границе преоптерећења (у стању преоптерећења долази до одбацивања пакета и смањења пропусности). Потом се покрећу симулације за *offline* EE-DWPBA алгорита и *online* EE-DWPBA алгорита без ASC механизма. Сада се постиже слична ситуација као и у симулацијама за EE-FWPBA алгорита да је количина неалоцираног пропусног опсега у систему мања од 10%, и сматра се да систем ради у условима повишеног оптерећења. Подаци добијени о просечном и максималном кашњењу

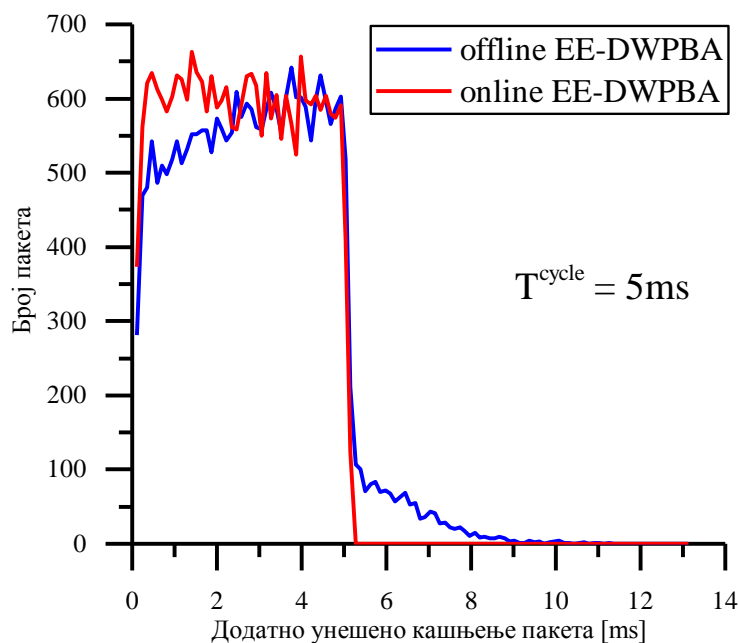
пакета за сервисе осетљиве на кашњење (VoIP и остали сервиси EF класе саобраћаја) наведени су у табели 6.14. Расподеле додатног кашњења пакета за сервисе EF класе једног корисника добијене из ових симулација приказане су на слици 6.4. Све симулације представљају догађаје у 3-минутној 100% оптерећеној мрежи, где сва 64 симулирана корисника користе све своје услуге током целог трајања симулација.

Табела 6.14: Резултати симулација EE WDM EPON система са *offline* и *online* EE-DWPBA алгоритмом у условима оптерећеног рада мреже

Циклус спавања [ms]	Минимална неактивност ONU јединице [%]		Додатно кашњење пакета (EF) [ms]			
	Offline EE-DWPBA	Online EE-DWPBA	Offline EE-DWPBA		Online EE-DWPBA	
			Средње	Макс.	Средње	Макс.
5	59.244	59.243	3.657	9.935	2.937	6.047
10	69.775	69.787	5.991	19.916	5.717	11.881
20	79.384	79.362	11.212	36.057	10.947	23.369
50	86.567	86.570	24.427	57.442	24.348	57.586

Симулације су показале да је максимално додатно унесено кашњење пакета мање када се примењује *online* DBA алгоритам. За временски осетљиве сервисе који припадају EF класи саобраћаја је, у симулацијама са трајањем циклусом спавања 5 ms, добијено да применом *offline* EE-DWPBA алгоритма максимална додатно унесена кашњења пакета износе око 10 ms, док су та максимална кашњења у *online* EE-DWPBA алгоритму око 6 ms. Разлог томе је то што код *online* DBA алгоритма корисницима који имају повећане захтеве за пропусним опсегом се у истом циклусу спавања додељује додатни временски слот у којем ће пренети свој саобраћај, док се код *offline* алгоритма мора чекати наредни циклус спавања за поновну алокацију пропусног опсега. Управо описана појава се уочава на слици 6.4 [32].

Потом је покренут сет симулација за *online* EE-DWPBA-ASC алгоритам. Адаптивни циклус спавања је највећа новина у симулацији и везано за њега има највише резултата. Разлог томе је параметар  $K$ , односно број циклуса спавања у којима није детектовано повишено оптерећење мреже након којег се повећава трајање циклуса спавања ради веће уштеде енергије. Када је укупни захтевани пропусни опсег свих корисника, тј. ONU јединица, већи од укупног гарантованог пропусног опсега за све кориснике у симулацији се проглашава повишено оптерећење мреже и трајање циклуса спавања се подешава на минимално трајање. До повишеног оптерећења може доћи у ситуацији када сви корисници користе све своје сервисе (или велика већина корисника), па ће се због *burst* природе етернет саобраћаја у бафере OLT-а сместити повећана количина пакета. Када се  $K$  узастопних циклуса спавања не детектује повишено оптерећење циклус спавања се повећава на наредну вредност, и тако сваких  $K$  циклуса спавања до максималног дефинисаног трајања циклуса спавања. У симулацијама су коришћена четири циклуса спавања: 5 ms, 10 ms, 20 ms и 50 ms. У било ком тренутку симулације, односно рада мреже, и за било коју дужину циклуса спавања, када се детектује повишено оптерећење трајање циклуса се одмах обара на минималну вредност.



Слика 6.4: Додатно унешена кашњења пакета EF класе саобраћаја за *Offline* и *Online* EE-DWPBA алгоритме [32]

Предност алгоритма који имплементира адаптивни циклус спавања је флексибилност мреже по питању перформанси у зависности од тренутног оптерећења. У алгоритмима без ове функционалности смо имали исте перформансе без обзира да ли се користе два сервиса од стране три корисника или сви сервиси од стране нпр. 62 корисника, јер смо све време током рада приступне мреже фиксирани трајање циклуса спавања на једну вредност.

Перформансе EE WDM EPON мреже са *offline* EE-DWPBA алгоритмом без адаптивног циклуса спавања су приказане у табели 6.9. Ове вредности одговарају перформансама *online* EE-DWPBA-ASC у условима када нема детектованог повишеног оптерећења. Разлог томе је то што ће систем тада користити циклус спавања трајања 50 ms и ONU јединице неће захтевати додатни пропусни опсег, а перформансе за циклусе спавања од 10 ms и 20 ms ће мрежа имати само у кратком временском периоду током изласка из оптерећеног стања.

Симулације су покренуте за различите вредности параметра  $K$  да би се утврдило који  $K$  је довољно велик да спречи честе промене трајања циклуса спавања и спречи уношење велике варијације кашњења када сви корисници користе све услуге. Перформансе EE WDM EPON мреже са *online* EE-DWPBA-ASC у функцији параметра  $K$  када мрежа ради у условима повишеног оптерећења, су приказане у табели 6.15. 6.15 приказује промене активног стања ONU јединице, максималног и просечног додатног кашњења пакета, док су расподеле додатног кашњења пакета EF класе за различите вредности параметра  $K$  приказане на слици 6.5.

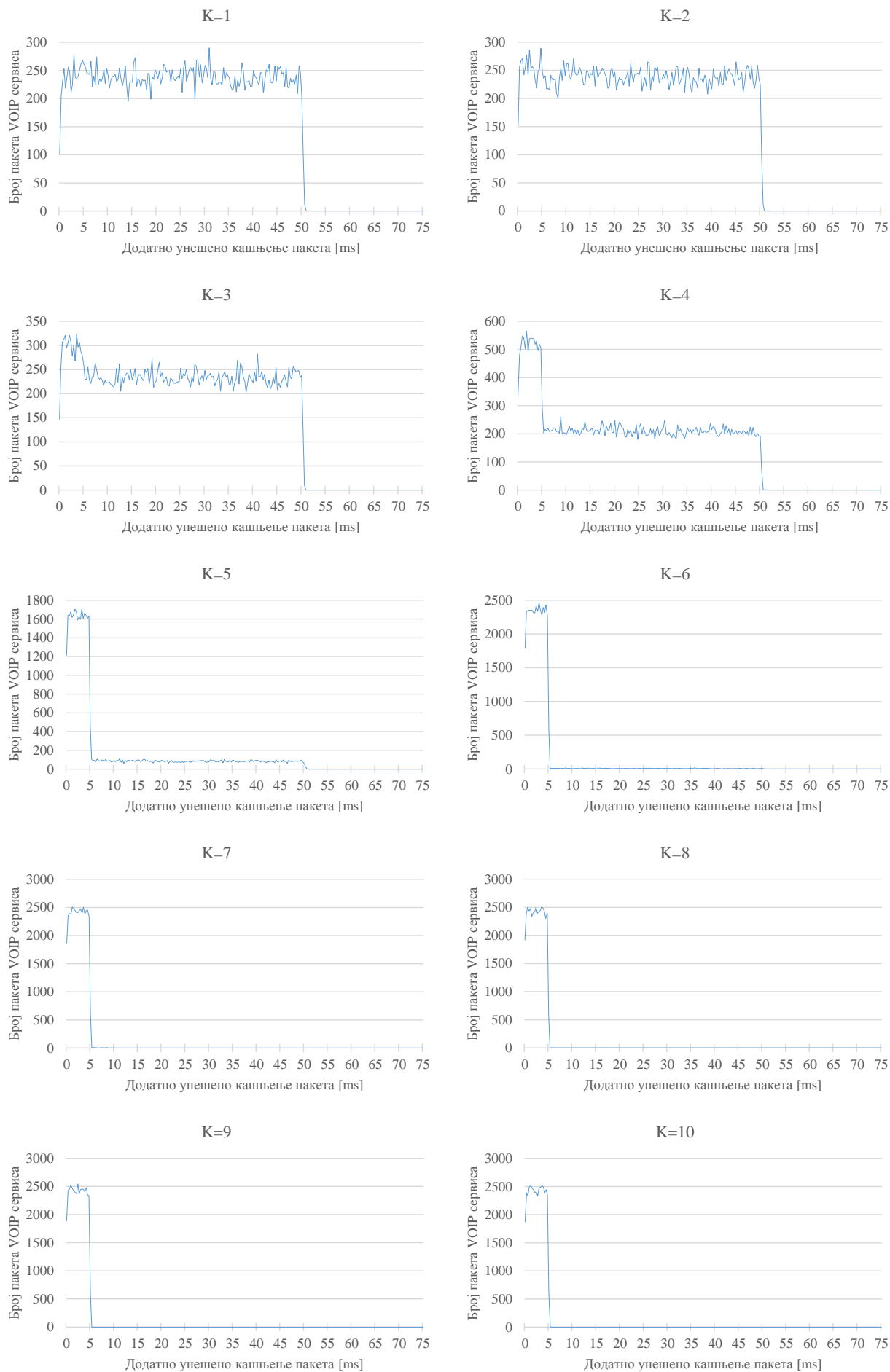
Из табеле 6.15 и слике 6.5 видимо да је за  $K > 7$  максимално унешено кашњење мало и да имамо добру расподелу кашњења пакета што смањује велике варијације кашњења пакета. Симулације су показале да у условима великог оптерећења мреже 99% циклуса спавања има минимално трајање (тј. 5 ms). Због тих резултата, вредност параметра  $K = 10$  је изабрана као најбоља за примену у EE-DWPBA-ASC ради постизања најбољих перформанси.

Табела 6.15: Додатно унесена кашњења пакета, неактивност ONU јединица, циклуси спавања и количина неалоцираног пропусног опсега за различите вредности параметра  $K$  у EE-DWPBA-ASC алгоритму

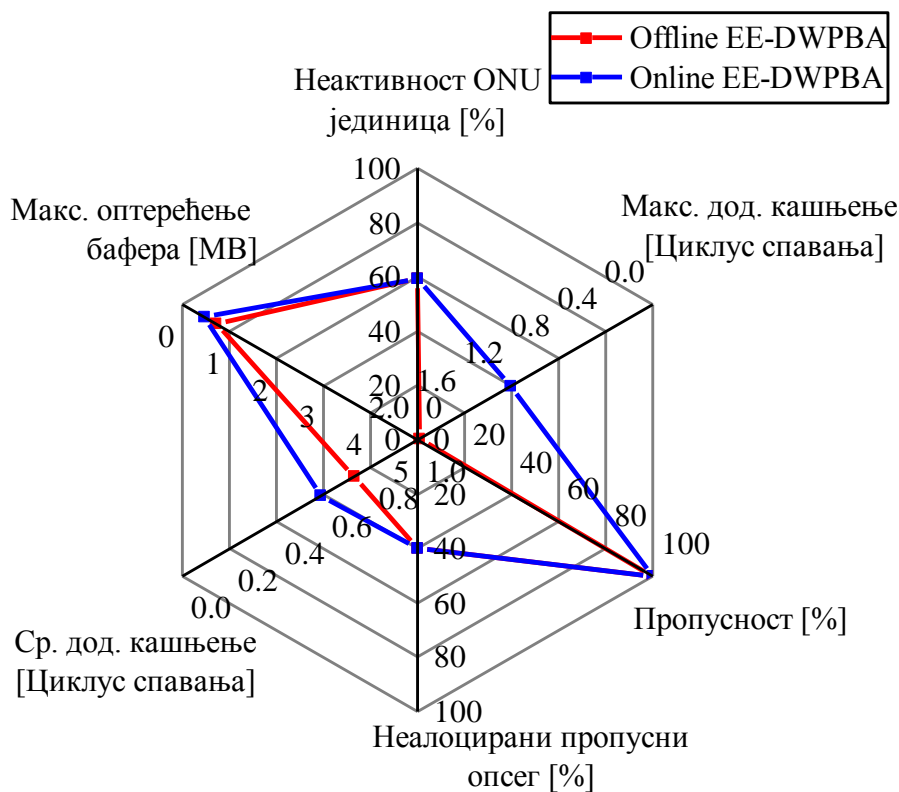
Вредност параметра $K$	Додатно кашњење пакета [ms]		Број коришћених циклуса спавања				Неалоцирани пропусни опсег [%]			ONU неакт. време
	Средње	Макс.	5 ms	10 ms	20 ms	50 ms	EF	AF	BE	
1	25.225	53.785	137	5	5	3584	98.9	30.5	7.9	86.354
2	25.018	54.261	414	20	16	3549	98.9	30.5	8.0	86.104
3	24.748	53.545	938	31	18	3493	98.9	30.4	7.9	85.659
4	22.381	53.278	4532	64	26	3124	98.6	30.2	7.7	82.740
5	10.714	54.156	22996	66	20	1280	97.5	28.9	6.2	67.924
6	3.395	53.244	34684	24	7	124	96.7	28.1	5.3	58.587
7	2.581	22.176	35880	58	1	0	96.7	28.0	5.2	57.608
8	2.570	13.207	35978	11	0	0	96.7	28.0	5.2	57.595
9	2.573	5.144	36000	0	0	0	96.7	28.0	5.2	57.577
10	2.569	5.146	36000	0	0	0	96.7	28.0	5.2	57.590

У ситуацији када EE WDM EPON мрежа није у стању повишеног оптерећења перформансе *online* EE-DWPBA-ASC алгоритма су сличне перформансама *offline* EE-DWPBA алгоритма у којем је циклус спавања подешен на 50 ms. Дакле, може се остварити велика уштеда енергије, јер, примера ради, ONU јединице са најзахтевнијим пакетом саобраћаја су неактивне 86% времена, док су у условима повишеног саобраћаја у мрежи неактивне 59% времена али су зато кашњења пакета сведена на минимум (око 2,5 ms) уз напомену да нема одбачених пакета у баферима и да је максимална варијација додатно унесеног кашњења пакета око 5 ms. Тако имамо да се и у условима оптерећеног рада мреже остварују значајне уштеде енергије без деградације квалитета сервиса.

На слици 6.6 је приказано поређење перформанси *offline* EE-DWPBA алгоритма и *online* EE-DWPBA-ASC алгоритма у условима повишеног оптерећења мреже. Површина шестоугаоне фигуре коју формирају вредности *offline* EE-DWPBA параметара је 0.22, док је површина фигуре за *online* EE-DWPBA-ASC алгоритам 0.35. Из приказаног поређења се закључује да су у условима повишеног оптерећења EE WDM EPON мреже додатно унесена кашњења пакета у симулираном *online* EE-DWPBA-ASC алгоритму знатно мања, док су остали параметри врло слични, и због тога је квалитет сервиса који се пружа крајњем кориснику бољи у овом алгоритму уз остварену значајну уштеду енергије.



Слика 6.5: Расподела додатно унешеног кашњења у симулацијама са EE-DWPBA-ASC алгоритмом за пакете EF класе саобраћаја у зависности од параметра  $K$



Слика 6.6: Заједнички приказ резултата симулација EE WDM EPON система у виду хексагона ради лакшег поређења укупних перформанси *online* и *offline* EE-DWPBA алгорита

## 6.4. Резултати симулација EE WDM EPON мреже са брзином преноса података од 10 Gb/s

Са повећањем брзине преноса између OLT-а и ONU јединица смањује се и време потребно за пренос исте количине података у односу на мреже у којима је брзина преноса 1 Gb/s. Због тога се смањује и време ONU јединице проведено у активном режиму рада, што за последицу има повећање времена спавања ONU јединице и веће уштеде енергије. Веће уштеде енергије се остварују и због чињенице што примопредајници који раде на већим брзинама преноса за свој рад користе више енергије у односу на 1 Gb/s примопредајнике, па се самим њиховим гашењем и неактивношћу штеди већа количина енергије [46]. Резултати симулација покренути за улазне параметре из табеле 6.1 (осим за ширину пропусног опсега по таласној дужини која је сада 10 Gb/s) и сервисе и пакете услуга из табела 6.2 и 6.3 приказани су у табели 6.16. Симулације су покренуте за различите вредности циклуса спавања и за EE-FWPBA и EE-DWPBA алгорита. Треба напоменути да оптерећење мреже сервисима приказаним у табелама 6.2 и 6.3 није адекватно, јер EE WDM EPON мрежа са брзином протока од 10 Gb/s располаже са знатно већим капацитетима. То проширење капацитета је потребно када се повећава број корисника у систему, или када се уведе нови сервиси, као на пример UHDTV (енгл. *Ultra-High Definition Television*) који ће за потребе 4K резолуције захтевати пропусни опсег од најмање 30 Mb/s, а 8K UHDTV ће за свој рад користити барем 90 Mb/s. Примећује се да ће будући сервис бити много захтевнији када се упореде са постојећим SDTV и HDTV сервисима који раде са битским протоцима података од 4 Mb/s и 10 Mb/s, респективно. Нове генерације мобилне телефоније предвиђају пренос података од базних станица и корисника до контролера базних станица преко приступне

пасивне оптичке инфраструктуре и ONU јединица, тако да ће се и због тога морати обезбедити додатни капацитети у будућим EPON системима.

Табела 6.16: Резултати симулација 10G EE WDM EPON система

Циклус спавања	Алгоритам	Минимална неактивност ONU јединице	Додатно кашњење пакета (EF)	
			Средње	Максимално
5 ms	EE-FWPBA	79.757%	2.669 ms	5.396 ms
	EE_DWPBA	79.730%	2.684 ms	5.094 ms
10 ms	EE-FWPBA	89.685%	5.214 ms	10.769 ms
	EE_DWPBA	89.728%	5.365 ms	10.169 ms
20 ms	EE-FWPBA	94.685%	10.632 ms	21.407 ms
	EE_DWPBA	94.726%	10.419 ms	20.346 ms
50 ms	EE-FWPBA	97.690%	24.715 ms	53.449 ms
	EE_DWPBA	97.731%	25.293 ms	50.742 ms

Докторска теза симулацијама испитује могућности за уштедом енергије уз обезбеђивање гарантованог квалитета сервиса у EE WDM EPON система у најнеповољнијим условима, а то су, поред повећаног оптерећења мреже и коришћења свих сервиса од стране корисника, и минимална брзине преноса података. У случају EPON мрежа то је брзина преноса од 1 Gb/s. Ипак, овде су представљени резултати и за битске брзине од 10 Gb/s како би се показало да уштеде енергије у EPON системима нове генерације применом механизма које предлаже докторка дисертација могу бити само веће.

## 6.5. Резиме

У овом поглављу су представљени резултати симулационих анализа EE WDM EPON мрежа описаних у претходном поглављу. За сва три енергетски ефикасна DBA алгоритма су покретане симулације са истим вредностима параметара (број корисника, циклуси спавања, брзине преноса сигнала, итд.), а такође су и симулираним крајњим корисницима додељивани исти пакети сервиса како би добијени резултати били поредљиви јер су добијени под истим условима. Како би се остварило максимално оптерећење мреже током симулација сви симулирани корисници користе све додељене сервисе током све време током трајања симулација. Такође су дефинисани и сервиси који су коришћени у симулација, као и класе сервиса којима су ти сервиси додељени. За сва три алгоритма су представљени добијени резултати и међусобно поређени како би се уочиле разлике и побољшања у алгоритмима. Резултати су проценат времена ONU јединица проведен у неактивном стању, тј. режиму спавања, потом додатно унешено кашњење пакета у смеру ка кориснику, заузети пропусни опсег за сваку таласну дужину, односно за сваку класу саобраћаја, заузетост бафера у елементима EE WDM EPON система, итд. Резултати су приказани и графички и табеларно, и показују да је применом имплементираних механизма за уштеду енергије у четвороканалним WDM EPON мрежама могуће уштедети значајну количину електричне енергије без нарушавања гарантованог квалитета сервиса.



## 7. Закључак

Последњих година присутан је пораст загађења животне средине као последица испуштања све већих количина угљен диоксида у атмосферу. Један од главних загађивача животне средине су термоелектране које за производњу електричне енергије сагоревају фосилна горива. Сведоци смо и све бржег развоја дигиталних сервиса који су све присутнији и све приступачнији корисницима широм света. Са развојем и ширењем нових сервиса се паралелно шире и развијају савремене телекомуникационе мреже преко којих се ти нови сервиси пружају крајњим корисницима. Савремене телекомуникационе мреже због све већих брзина преноса и константног раста броја корисника, за свој рад захтевају све више електричне енергије и имају значајан удео у укупној светској потрошњи исте. Са повећањем потрошње електричне енергије повећава се и њена производња што је у супротности са глобалним тежњама да се смањи производња енергије из фосилних горива која има негативни утицај на климатске промене. Највећи део у потрошњи енергије у савременим телекомуникационим мрежама имају приступне мреже. Због повећаних захтева за капацитетом приступних мрежа пасивне оптичке мреже се виде као главна технологија која ће се у будућности користити у делу приступних мрежа. Циљ ове докторске дисертације је да представи начине на које се може смањити потрошња електричне енергије у WDM EPON мрежама базираним на мултиплексирању по таласним дужинама и образложи механизме чија би имплементација довела до уштеде електричне енергије у овим приступним мрежама.

Докторска теза представља механизме чија имплементација у WDM EPON мреже доприноси значајном смањењу електричне потрошње ONU јединица инсталираних на локацијама крајњих корисника. Ради увођења механизма за уштеду енергије у EPON системима потребно је реорганизовати начин преноса саобраћаја од OLT-а ка ONU јединицама у циљу преноса у унапред додељеним временским слотовима, баш као што се преносе и у супротном смеру. Организовањем саобраћаја по TDM принципу за смер преноса ка кориснику и додавањем бафера у OLT како би се омогућио такав пренос се теоретски уводи додатно кашњење пакета од максимално два циклуса спавања. Резултати симулација показују да је додатно кашњење пакета мање од трајања два циклуса спавања, у просеку чак мање од трајања једног циклуса спавања. Доминантни део кашњења пакета са краја на крај је обрада пакета у приступној мрежи (ивични рутери (енгл. *edge router*) и уређаји крајњег корисника), док је пакетско кашњење кроз транспортну оптичку мрежу углавном једнако пропагационом кашњењу оптичког сигнала. Стога је важно напоменути да се увођењем циклуса спавања омогућава контрола додатно унесеног кашњења пакета и ефикасна QoS

имплементација. Време спавања ONU јединице се повећава како се повећава и циклус спавања, али истовремено се повећава и заузетост новоинсталираних OLT бафера и додатно унесено кашњење пакета узроковано њиховим баферисањем. Истовремено пружање загарантованог квалитета сервиса кориснику и уштеда енергије су могући уз компромис између трајања циклуса спавања и додатно унесеног кашњења пакета. Резултати симулација су показали да је и уз минимално трајање циклуса спавања и минимално кашњење пакета, што је истовремено и максимални квалитет сервиса који се пружа крајњем кориснику, могуће остварити значајне уштеде енергије тако што ће ONU јединица у зависности од имплементационог алгоритма за динамичку доделу пропусног опсега провести у неактивном стању од 55% до 80% времена рада. Уз повећање трајања циклуса спавања, одржавајући при том гарантовани квалитет сервиса, ONU јединице могу бити у неактивном режиму рада и преко 90% времена рада, до чак 95% времена.

Представљена су три алгоритма за динамичку алокацију пропусног опсега. Први од њих је EE-FWPBA алгоритам, који је најједноставнији и са њим је могуће постићи највеће уштеде енергије у ONU јединицама. Међутим, како алгоритам за саобраћај све три класе саобраћаја у EE WDM EPON систему додељује јединствени временски слот за пренос саобраћаја тако се на свим таласним дужинама алоцира исти пропусни опсег и таласне дужине се не додељују следећој ONU јединици све док једна ONU јединица врши пренос по било којој од три таласне дужине. Овакав начин алокације ресурса има за последицу алокацију више пропусног опсега на таласним дужинама за које је захтеван мањи пропусни опсег што доводи да се у целом систему по одређеним таласним дужинама непотребно алоцира пропусни опсег који се не користи за пренос саобраћаја. У другом представљеном алгоритму, тј. у *offline* EE-DWPBA алгоритму се врши независно додељивање пропусног опсега за сваку таласну дужину (класу саобраћаја) и тиме смањује неактивни период ONU јединица у циклусу спавања. То је и очекивано, јер временски слотови за различите таласне дужине више нису синхрони и предајници не раде истовремено. Симулације су показале да ти неактивни периоди ONU јединица нису знатно мањи у односу на периоде добијене симулацијама EE-FWPBA алгоритма, али су зато резултати за количину неалоцираног пропусног опсега значајно бољи у односу на EE-FWPBA модел. Такође, у резултатима симулација са *offline* EE-DWPBA алгоритмом су примећена значајна смањена максималних додатно унесених кашњења пакета изазваних новим баферима у OLT-у. Дакле, независном обрадом захтева за сваку класу саобраћаја и одвојеном расподелом ширине опсега на свакој таласној дужини, велики део укупне ширине опсега остаје неалоциран и самим тим неискоришћен. Трећи алгоритам представљен у докторској дисертацији, *online* EE-DWPBA, у оквиру истог циклуса спавања додатно додељује неискоришћени пропусни опсег ONU јединицама које су захтевале већи пропусни опсег од додељеног. На тај начин се додатно смањује новонастало кашњење пакета, док је уштеда енергије и даље на виском нивоу – преко 55% у симулираним условима повишеног оптерећења мреже. Увођењем адаптивног циклуса спавања (ASC) вредности QoS параметара се третирају као приоритет користећи минимално трајање циклуса спавања када се детектује повећано оптерећење бафера како би се кашњење пакета svelo на минимум. Када се детектује ниже оптерећење бафера, тј. када неко време нема прекомерних захтева за додатним пропусним опсегом, трајање циклуса спавања се постепено повећава. Ово смањује компромис између трајања циклуса спавања (и самим тим уштеде енергије) и кашњења пакета, јер пакети увек имају минимално кашњење уз ниже уштеде енергије током великог мрежног оптерећења (резултати симулација показују да ONU јединице могу бити неактивне преко 55% времена рада), док се велике уштеде енергије јављају при ниском мрежном оптерећењу кад неактивност ONU јединица може бити и до 90% времена. У прва два DBA алгоритма се користило фиксно трајање циклуса спавања, тако да је уштеда енергије увек била остварива у компромису са кашњењем пакета. У EE-DWPBA-ASC алгоритму уштеде енергије зависе искључиво од тренутног оптерећења мреже, док је гарантовани квалитет сервиса који се пружа крајњем кориснику у потпуности задовољен све време током рада система.

Поређењем резултата добијених симулацијама за EE-FWPBA и EE-DWPBA алгоритме се јасно уочава да боље перформансе има EE-DWPBA алгоритам. Такође поређењем *offline* EE-DWPBA и *online* EE-DWPBA-ASC алгоритама се закључује да је у истим условима рада – бољи *online* EE-DWPBA-ASC. Као закључак се изводи да у погледу уштеде енергије и обезбеђеног квалитета сервиса доминантне перформансе показује EE WDM EPON систем са имплементираним *online* EE-DWPBA-ASC алгоритмом за доделу пропусног опсега.

Симулације су рађене на четвороканалном WDM EPON систему који је представљен у [7] и који мапирањем таласне дужине и класе саобраћаја обезбеђује имплементацију и пружање квалитета сервиса у мрежи. Предност механизма у докторској дисертацији лежи у томе што се описани механизми могу имплементирати у било који други EPON приступни систем, вишеканални или једноканални. У докторској дисертацији су симулације рађене за систем који за пренос између OLT-а и ONU јединица користи примопредајнике који пренос података врше брзинама од 1 Gb/s, јер је то најнеповољнији сценарио и било је важно симулирати у том окружењу могућности за уштедом енергије. За сваку већу битску брзину преноса података уштеда енергије је већа јер се иста количина података пренесе за краће време па је потребно доделити мањи временски слот ONU јединици, те самим тим ће она већи део циклуса спавања провести у неактивном режиму рада. Због тога се представљени механизми за уштеду енергије могу успешно имплементирати и у 10G-EPON, 25G-EPON и 50G-EPON системе уз једнаке или боље резултате у погледу уштеде електричне енергије.

Пошто данас већина домаћинстава, тј. стамбених јединица, у урбаним срединама има широкопојасни притуп интернету, телевизији, телефонији и мултимедијалним сервисима преко оптичких приступних мрежа, могуће је на примеру једне градске улице, стамбене четврти или блока илустровати колике су могућности за уштеду енергије уколико би се уместо стандардних ONU јединица и EPON мрежа имплементирале енергетски ефикасне четвороканалне EPON мреже описане у докторској дисертацији. Потрошња стандардне ONU јединице у активном режиму рада је 10W док је њена потрошња у неактивном режиму рада 1W [47][48]. Потрошње неколико комерцијално доступних ONU јединица су дате у поглављу Прилог. Претпоставимо да један типичан градски стамбени блок има 9 солитера са по 60 станова, од којих укупно 500 станова користи EPON ONU јединице. Када нема имплементираних механизма за уштеду електричне енергије у овим ONU јединицама оне на годишњем нивоу потроше  $E_{STD-ONU}$ :

$$E_{STD-ONU} = 10 W \cdot 500 ONU \cdot 24 h \cdot 365 \text{ дана} = 43 MWh \quad (7.1)$$

док би у случају имплементираних представљених решења за енергетски ефикасне WDM EPON мреже годишња потрошња енергије ONU јединице која 80% времена рада проведе у неактивном режиму (а 20% у активном режиму рада) била  $E_{EE-ONU}$

$$E_{EE-ONU} = (0.2 \cdot 10 W + 0.8 \cdot 1 W) \cdot 500 ONU \cdot 24 h \cdot 365 \text{ дана} = 12.264 MWh \quad (7.2)$$

Из израза (7.1) и (7.2) се види да је годишња уштеда електричне енергије за стамбену четврт из примера нешто више од 30 MWh. Према подацима Електропривреде Србије [49][50] годишња производња термоелектрана „Костолац А и Б“ је 5989 GWh. Из овог податка се добија да је за производњу 30 MWh термоелектранама „Костолац А и Б“ потребно око 3 минута рада да би произвеле оволику количину електричне енергије. Дакле, само једна градска улица, или стамбена четврт са 9 зграда може годишње да уштеди 3 минута рада термоелектрана „Костолац А и Б“ које за производњу енергије која се уштеди сагори око 12 тона угља [1][51]. Следећи пример се односи на једно индивидуално домаћинство, које би

коришћењем енергетски ефикасне ONU јединице на дневном нивоу према подацима [47][48] потрошила 67.2 Wh, док би та потрошња на дневном нивоу за стандардну EPON ONU јединицу без имплементираних механизма за уштеду енергије била 240 Wh. Енергија која би се уштедела применом описаним механизма за уштеду енергије је 172.8 Wh, што је једнако енергији потребној за шесточасовни рад 3 LED сијалице од 9W (које се сматрају заменом за класичне сијалице са ужареним влакном од 75W). Дакле, само на нивоу једне стамбене јединице се постиже уштеда енергије, довољна за потребе дневне расвете те исте стамбене јединице. Широм света се једном годишње почевши од 2007. године, а у Србији од 2009. године, организује акција „Један сат за Планету“ [52] током које се на један сат гасе све сијалице од стране учесника акције и тако покушава скренути пажњу на повећану потрошњу енергије и негативни утицај на климатске промене. Могућности за уштеду енергије имплементацијом енергетски ефикасних WDM EPON се могу огледати и у томе да би уместо гашења светала на један сат једном годишње, могли да угасимо сво светло у простору у којем живимо и то сваки дан.

# Прилог

У прилогу су дати изводи из техничке документације (енгл. *Datasheet*) комерцијално доступних ONU јединица. Ови изводи садрже податак о потрошњи ONU јединице.


- COMMSCOPE C1004 10G EPON ONU – 18.5W

COMMSCOPE®		Product Specifications	
ELECTRICAL SPECIFICATIONS			
PARAMETER	SPECIFICATION		COMMENTS
Electromagnetic Compatibility/Interference	ANSI C63.4   AS/NZS 4771/Amdt 1   C-Tick   CAN/CSA 22.2 no. 60065   EN 300 328 V1.7.1   EN 301 489-1 V1.9.2   EN 55022 Class B   EN 60950-1   IC RSS-210, Issue 8   IRAM   UL 60065   US FCC Part 15 Subpart C		
Power Consumption, maximum	18.5 W		
Voltage	12.0 Vdc		
Power Adapter	Input Voltage: 100-220VAC, 50/60Hz Output: 12VDC, 3A		


- COMMSCOPE C1004W 10G EPON ONU – 16.9W

Specification		
Item	Description	
Standard	IEEE 802.1q	
System Architecture	Type	Desktop
	Size (mm)	288.50(W) x 186.60 (D) x 150.00(H) (incl. antenna)
	Weight	820g
Power	Input: 100 ~ 220VAC, 50~60Hz	
	Output: 12VDC, 3A (The input terminal that a power adaptor is connected to)	
	Consumption: Max 16.9W	
Available Interface	PON interface	10/10, 10/1, 2/1, 1/1 Gbps supported
	User interface	Four 10/100/1000base-Tx MDI/MDIX Auto Negotiation

- RAISECOM ISCOM5104-EA EPON ONU – 10W




**RAISECOM**  
Raisecom Technology Co., Ltd.



▼ Specifications

Hardware features	
<b>Model</b>	<b>ISCOM5104-EA</b>
<b>Dimensions</b>	260 mm (Width) × 130 mm (Depth) × 44 mm (Height)
<b>Weight</b>	About 1 kg
<b>Power supply</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 220 VAC: 100–240 VAC</li> <li>● 60 VAC: 35–85 VAC</li> <li>● 48 VDC: -36 to -72 VDC</li> <li>● 24 VDC: 18–36 VDC</li> <li>● 12 VDC: 11–18 VDC</li> </ul>
<b>Power consumption</b>	≤ 10 W


- DatoCom DC600-301GAW-HR220 EPON ONU – 6.5W



**PRODUCTS SPECIFICATIONS**  
DC600-301GAW-HR220 EPON ONU

Function	Log management
Shell	Plastic casing
Power	Power supply: DC 12V /1A Power consumption: <6.5W
Physical Specifications	Item Dimension : 160mm(L)*140mm(W)*29mm(H) Item weight : 0.2kg
Environmental Specifications	Operating temperature: 0 to 50°C Storage temperature: -40 to 85°C Operating humidity: 10% to 90%(Non-condensing) Storage humidity: 10% to 90%(Non-condensing)

- Telesail TSCOM TP1004 EPON ONU – 10W



**TELESAIL**  
www.telesail.com

## Specification

**Physical**

- Dimensions  
170 mm(W) x 98 mm (D) x 28 mm(H)
- Weight: <0.5kg

**Power and Environmental**

- Power Consumption:<10W

**Layer 2 switching Functions**

- STP/RSTP
- Port based Vlan,IEEE802.1Q with 4K VLANs handling
- VLAN Stacking(QinQ),selective QinQ
- IEEE 802.3ad link aggregation(LACP)
- IEEE802.3x in full duplex, back pressure in half duplex.Head of Line

**Quality of Service (QoS)**

- 4 CoS queuing
- IEEE 802.1 p and DSCP PRI Mark/remark
- SP and WRR congestion management
- Classification based Traffic Metering, Shaping and Marking
- CAR

- HUAWEI HG8240H GPON ONT – 10W

<b>Huawei HG8240H Specification</b>			
<b>Device Parameters</b>			
<b>Dimensions (H x W x D) (mm)</b>	176 mm x 138.5 mm x 28 mm	<b>System power supply</b>	11–14 V DC, 1 A
<b>Weight</b>	< 500 g	<b>Static power consumption</b>	4 W
<b>Operating temperature</b>	0°C to +40°C	<b>Maximum power consumption</b>	10 W

- HUAWEI HG8242H GPON ONT – 14W

<b>Huawei HG8242H Specification</b>			
<b>Device Parameters</b>			
<b>Dimensions (H x W x D) (mm)</b>	220 mm x 160 mm x 32 mm	<b>System power supply</b>	11–13 V DC, 2 A
<b>Weight</b>	< 500 g	<b>Static power consumption</b>	5.5 W
<b>Operating temperature</b>	0°C to +40°C	<b>Maximum power consumption</b>	14 W

- AMT EPON ONU – 10.1W

Line speed		<b>79 NTSC CW channels + Digital</b>	
Downstream:	1.25 Gbps	CNR:	> 49 dB
Upstream:	1.25 Gbps	CSO:	> 55 dBc
Optical connector:	SC/APC, E2000/APC	CTB:	> 61 dBc
<b>Fast Ethernet Subscriber Ports</b>		<b>General</b>	
Interface:	Auto-negotiation, 10/100Mbps, full/half duplex	Power input	
IEEE802.1D:	64 MAC addresses per Ethernet port	Mains:	16 Vac, 1.5 A
IEEE802.1Q:	VLAN mapping to LLID	External battery:	11 Vdc to 15 Vdc
IEEE802.1P:	7 priority queues with L2/L3/L4 classification	Power consumption:	
Frame size:	64 to 1522 bytes	CATV receiver:	2.7 W
		Fast Ethernet node:	3.4 W
		Voice adapter:	4.0 W
		External battery:	Sealed lead-acid 13.8 V, 7 Ah

- RAISECOM ISCOM5104-H1 EPON ONU – 10W



Datasheet

## ISCOM5104-H1 EPON ONU

### Specification

PON interface	<ul style="list-style-type: none"> <li>1 PON interface</li> <li>SFF optical module</li> <li>SC/PC connector</li> <li>Single mode, single-strand</li> <li>1490nm continuous receive</li> <li>1310nm burst transmit</li> <li>Symmetric 1.25Gbps</li> <li>20km distance</li> <li>split ratio:1:32, 1:64</li> <li>Indicators: LNK</li> </ul>
Ethernet interface	<ul style="list-style-type: none"> <li>4*10/100M auto-negotiation</li> <li>RJ45 connector</li> <li>Full/half duplex mode</li> <li>Auto MDI/MDI-X</li> <li>100m distance</li> <li>Indicators: LNK, ACT;</li> </ul>
Dimension	180(W)*39(H)*123(D) mm
Weight	< 1.0kg
Power supply	External 12V power supply adapter
Power consumption	≤ 10W (at max load)
Working environment	<ul style="list-style-type: none"> <li>Temp: 0 ~ 40 Celsius</li> <li>RH:10 ~ 95% non-condensing</li> </ul>
Storage environment	<ul style="list-style-type: none"> <li>Temp: - 40 ~ 70 Celsius</li> <li>RH: 5 ~ 95% non-condensing</li> </ul>



# Литература

- [1] “International Energy Outlook 2017”; <http://www.eia.gov/outlooks/archive/ieo17/>
- [2] “International Energy Outlook 2010”; <http://www.eia.gov/outlooks/archive/ieo10/>
- [3] “Organisation for Economic Co-operation and Development”; <http://www.oecd.org>
- [4] A. Gladisch, C. Lange, R. Leppa, “Power efficiency of optical versus electronic access networks”, Proc. European Conference and Exhibition on optical communications, Brussels (2008)
- [5] Y. Suh, K. Kim, A. Kim, Y. Shin, “A study on impact of wired access network for green Internet”, Journal of Network and Computer Applications , Vol. 57, Issue C, pp. 156–168 (2015)
- [6] J. Baliga, R. Ayre, W.V. Sorin, K Hinton, R.S. Tucker, “Energy Consumption in Access Networks”, OFC 2008, San Diego, USA, paperOThT6 (2008)
- [7] M. Radivojevic, P. Matavulj, “The Emerging WDM EPON”, 978–86-7466-449-0. Academic Mind, Belgrade, SRB (2012)
- [8] IEEE Std 802.3ah-2004, [http://www.ieee802.org/21/doctree/2006\\_Meeting\\_Docs/2006-11\\_meeting\\_docs/802.3ah-2004.pdf](http://www.ieee802.org/21/doctree/2006_Meeting_Docs/2006-11_meeting_docs/802.3ah-2004.pdf)
- [9] ITU-T Recommendation G.983.1, “Broadband optical access systems based on Passive Optical Networks (PON)”, (10/1998)
- [10] ITU-T Recommendation G.984.1, “Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics”, (03/2003)
- [11] IEEE Std 802.3av-2009, <http://www.ieee802.org/3/av/>, (2009)
- [12] ITU-T Recommendation G.987, “10-Gigabit-capable passive optical network (XG-PON) systems: Definitions, abbreviations and acronyms”, (01/2010)
- [13] ITU-T Recommendation G.9807.1, “10-Gigabit-capable symmetric passive optical network (XGS-PON)”, (06/2016)
- [14] ITU-T Recommendation G.989, “40-Gigabit-capable passive optical networks (NG-PON2): Definitions, abbreviations and acronyms”, (10/2015)
- [15] IEEE 802.3 Ethernet Working Group, “IEEE 802.3 Industry Connections Feasibility Assessment for the Next Generation of EPON”, [http://www.ieee802.org/3/ad\\_hoc/ngepon/ng\\_epon\\_report.pdf](http://www.ieee802.org/3/ad_hoc/ngepon/ng_epon_report.pdf), (03/2015)
- [16] IEEE Std 802.3ca-2020, <http://www.ieee802.org/3/ca/>, (2020)
- [17] Y. Liquan, „The Evolutionary Path of NG-PON”, ZTE Technologies, 2017 No.5, (2017)
- [18] RFC 2475, <http://tools.ietf.org/pdf/rfc2475.pdf>

- [19] W. Wang, W. Guo, W. Hu, “Mechanism Design and Performance Analysis of Coordinated Registration Protocol for NG-EPON”, *J. Opt. Commun. Netw.*, Vol. 11, No. 3, pp. 107–117, (03/2019)
- [20] ITU-T G.Sup45, “GPON Power Conservation”;  
[https://www.itu.int/rec/dologin\\_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.Sup45-200905-I!!PDF-E](https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-G.Sup45-200905-I!!PDF-E)
- [21] A. R. Dhaini, Pin-Han Ho, Gangxiang Shen, “Toward Green Next-Generation Passive Optical Networks”, *IEEE Communications Magazine* Vol. 49, No. 11, pp. 94–101, (11/2011)
- [22] B. Skubic, D. Hood, “Evaluation of ONU Power Saving Modes for Gigabit-Capable Passive Optical Networks”, *IEEE Network*, Vol. 25, No. 2, pp. 20–24, (2011)
- [23] S. S. W. Lee, A. Chen, “Design and Analysis of a Novel Energy Efficient Ethernet Passive Optical Network”, *Proc. ICN ’10*, French Alps, France, (4/2010)
- [24] P. Vetter, D. Suvakovic, H. Chow, P. Anthapadmanabhan, K. Kanonakis, K.-L. Lee, F. Saliou, X. Yin, B. Lannoo, “Energy-Efficiency Improvements for Optical Access”, *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 52, No. 4, pp. 136-144, (4/2014)
- [25] R. Kubo, J.-I. Kani, H. Ujikawa, T. Sakamoto, Y. Fujimoto, N. Yoshimoto, H. Hadama, “Study and Demonstration of Sleep and Adaptive Link Rate Control Mechanisms for Energy Efficient 10G-EPON”, *IEEE/OSA J. Opt. Commun. and Netw.*, Vol. 2, No. 9, pp. 716–729, (9/2010)
- [26] S. Wong, L. Valcarenghi, S. Yen, D. R. Campelo, S. Yamashita, L. Kazovsky, “Sleep Mode for Energy Saving PONs: Advantages and Drawbacks”, *Proc. IEEE GLOBECOM ’09*, Honolulu, HI, USA, (12/2009)
- [27] J. Mandin, “EPON Power Saving via Sleep Mode”;  
[http://www.ieee802.org/3/av/public/2008-09/3av\\_0809\\_mandin\\_4.pdf](http://www.ieee802.org/3/av/public/2008-09/3av_0809_mandin_4.pdf)
- [28] J.-I. Kan, F. Bougart, A. Cui, A. Rafel, M. Campbell, R. Davey, S. Rodrigues, “Next-Generation PON—Part 1: Technology Roadmap and General Requirements”, *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 47, No. 11, pp. 43–49, (11/2009)
- [29] B. Schrenk, F. B. Bo, J. Bauwelinck, J. Prat, J. A. Lazaro, “Energy- Efficient Optical Access Networks Supported by a Noise-Powered Extender Box”, *IEEE J. Sel. Topics in Quantum Elect.*, (8/2010)
- [30] B. Pajcin, P. Matavulj, M. Radivojevic, “Simulation analysis of energy efficient WDM ethernet passive optical network”, DOI 10.1007/s11082-016-0572-4, *Optical and Quantum Electronics* 48:313 (2016)
- [31] B. Pajcin, P. Matavulj, M. Radivojevic, “Improving quality of service in four-channel WDM ethernet passive optical network”, DOI 10.1007/s11082-018-1637-3, *Optical and Quantum Electronics* 50:371 (2018)
- [32] B. Pajcin, P. Matavulj, M. Radivojevic, “Analysis of Online DBA Algorithm with Adaptive Sleep Cycle in WDM EPON”, DOI 10.1080/01468030.2018.1455928, *Fiber and Integrated Optics*, Vol. 37, Issue 3, pp. 171-184, (4/2018)
- [33] B. Pajcin, P. Matavulj, M. Radivojevic, “MPCP adjusting for improving QoS in Green WDM EPON”, 6th International Workshop on Fiber Optics in Access Networks – FOAN 2016, Lisbon – Portugal, pp. 29-34 (10/2016)
- [34] S. Chen, A. R. Dhaini, P.-H. Ho, B. Shihada, G. Shen, C.-H. Lin, “Downstream-based Scheduling for Energy Conservation in Green EPONs”, *J. Commun.* Vol. 7, No. 5, pp. 400–408, (2012)
- [35] Y. Luo, M. Sui, F. Effenberger, “Energy-efficient next generation passive optical network supported access networking”, *Opt. Switch. Netw.* Vol. 14, No. 1, pp. 43–52, (2014)
- [36] A. Dixit, B. Lannoo, D. Colle, M. Pickavet, P. Demeester, “Energy efficient dynamic bandwidth allocation for Ethernet passive optical networks: overview, challenges, and solutions”, *Opt. Switch. Netw.* Vol. 18, No. 2, pp. 169–179, (2015)

- [37] D. P. Van, L. Valcarenghi, M. Chincoli, P. Castoldi, "Experimental evaluation of a sleep-aware dynamic bandwidth allocation in multi-ONU 10G-EPON testbed", *Opt. Switch. Netw.* Vol. 14, No. 1, pp. 11–24, (2014)
- [38] G. Shagdar, J. Kim, G.-S. Park, "Sleep-Based Energy-Efficient DBA in an EPON Using the Controlling Mechanism for an ONU's Buffer Occupancy and Packet Delay", *J. Opt. Commun. Netw.* Vol. 7, No. 10, pp. 1001-1008, (2015)
- [39] K. Kondepu, L. Valcarenghi, D.P. Van, P. Castoldi, "Trading Energy Savings and Network Performance in Reconfigurable TWDM-PONs", *J. Opt. Commun. Netw.* Vol. 7, No. 5, pp. 470-479, (2015)
- [40] Y. Lv, N. Jiang, K. Qiu, C. Xue, "Energy-Efficient Load Adaptive Polling Sequence Arrangement Scheme for Passive Optical Access Networks", *J. Opt. Commun. Netw.*, Vol. 7, No. 6, pp. 516-524, (06/2015)
- [41] M. P. I. Dias, D. P. Van, L. Valcarenghi, E. Wong, "Energy-Efficient Framework for Time and Wavelength Division Multiplexed Passive Optical Networks", *J. Opt. Commun. Netw.*, Vol. 7, No. 6, pp. 496-504, (06/2015)
- [42] I.-S. Hwang, A. Nikoukar, Y.-M. Su, A. T. Liem, "Decentralized SIEPON-Based ONU-Initiated Tx/TRx Energy-Efficiency Mechanism in EPON", *J. Opt. Commun. Netw.*, Vol. 8 No. 4, pp. 238-248, (04/2016)
- [43] L. Wang, X. Wang, M. Tornatore, H. S. Chung, H. H. Lee, S. Park, B. Mukherjee, "Dynamic Bandwidth and Wavelength Allocation Scheme for Next-Generation Wavelength-Agile EPON", *J. Opt. Commun. Netw.*, Vol. 9, No. 3, pp. B33-B42, (03/2017)
- [44] ITU-T Recommendation Y.1564, "Ethernet service activation test methodology", (02/2016)
- [45] ITU-T Recommendation G.114, "One way transmission time", (05/2003)
- [46] Б. Пајчин, П. Матавуљ, М. Радивојевић, "Уштеде енергије у оптичким WDM EPON мрежама које користе 1Gb/s и 10Gb/s примопредајнике", *INFOTEH-JAHORINA* Vol. 15, pp. 290-294, (3/2016)
- [47] K. Togashi, H. Nishiyama, N. Kato, H. Ujikawa, K.-I. Suzuki, N. Yoshimoto, "Cross Layer Analysis on ONU Energy Consumption in Smart FiWi Networks", *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, Vol. 2, No. 6, pp. 695-698, (2013)
- [48] Advanced Media Technologies, Inc. (AMT), PBN EPON-ONU - current product specification, <http://www.goamt.com/wp-content/uploads/2015/08/EPON-ONU.pdf>
- [49] <http://www.eps.rs/lat/Poslovanje-EE/Stranice/Termoelektrane.aspx>
- [50] <http://www.eps.rs/cir/kostolac>
- [51] <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=667&t=2>
- [52] <https://www.earthhour.org/>

# Списак слика

Слика 1.1: Процена укупне потрошње енергије у свету од стране U.S. EIA [1][2].....	2
Слика 2.1: PON топологија .....	6
Слика 2.2: Топологија EPON мреже и илустрација начина преноса саобраћаја .....	8
Слика 2.3: Имплементација функционисања EPON и 10G-EPON архитектуре преко заједничке оптичке инфраструктуре .....	10
Слика 2.4: WDM EPON у којем се размена саобраћаја са сваком ONU јединицом врши преко независне таласне дужине .....	11
Слика 2.5: Архитектуре 25G-EPON и 50G-EPON система предложених у [16].....	12
Слика 2.6: Таласне дужина за пренос саобраћаја у 10G-EPON, 25G-EPON и 50G-EPON архитектурама.....	13
Слика 2.7: Правци развоја EPON мрежа у погледу брзина преноса по таласним дужинама и коришћењу WDM технологије .....	13
Слика 2.8: Општи формат MPCP контролних порука.....	14
Слика 2.9: MPCP механизам за мерење RTT пропагационог кашњења у EPON мрежи .....	16
Слика 2.10: Размена MPCP контролних порука између OLT-а и ONU јединице током режима аутоматског откривања.....	17
Слика 2.11: Структуре MPCP порука које се користе у режиму аутоматског откривања - а) GATE, б) REGISTER_REQ, в) REGISTER и г) REGISTER_ACK.....	18
Слика 2.12: Размена MPCP контролних порука између OLT-а и ONU јединица током нормалног мода рада.....	20
Слика 2.13: Структуре MPCP порука које се користе у нормалном моду рада - а) GATE и б) REPORT .....	21
Слика 3.1: Архитектура четвороканалног WDM EPON система представљеног у [7].....	24
Слика 3.2: Архитектура OLT-а у четвороканалном WDM EPON систему предложеном у [7]25	
Слика 3.3: Архитектура ONU јединице у четвороканалном WDM EPON систему предложеном у [7] .....	26
Слика 3.4: Размена контролних MPCP порука у FWPBA моделу WDM EPON система [7]....	27
Слика 3.5: Размена саобраћаја и начин доделе таласних дужина у FWPBA моделу WDM EPON система [7] .....	28
Слика 3.6: Размена контролних MPCP порука у DWPBA моделу WDM EPON система [7] ...	29
Слика 3.7: Размена саобраћаја и начин доделе таласних дужина у DWPBA моделу WDM EPON система [7] .....	30

Слика 3.8: Проширења структура контролних MPCP порука ради подршке четвороканалном WDM EPON систему – а) проширење GATE поруке и б) проширење REGISTER_REQ поруке.....	33
Слика 4.1: Поређење потрошњи ONU јединице током различитих режима рада уз примену софтверских техника за уштеду енергије [21].....	35
Слика 4.2: Имплементација хибридног механизма из [25].....	37
Слика 5.1: Архитектура EE WDM EPON система и илустрација размене саобраћаја између OLT-а и ONU јединица по таласним дужинама.....	40
Слика 5.2: Архитектура OLT-а у EE WDM EPON систему.....	41
Слика 5.3: Трајање циклуса спавања у режиму рада ONU јединице у EE WDM EPON систему.....	42
Слика 5.4: Илустрација разлике између масивног начина преноса (горњи дијаграм) и уобичајеног, односно константног, преноса (доњи дијаграм) у етернет мрежама	43
Слика 5.5: Илустрација размене саобраћаја, контролних порука, алокације таласних дужина и трајања временских слотова и времена спавања ONU јединица у оквиру EE-FWPBA алгоритма за алокацију пропусног опсега .....	46
Слика 5.6: Илустрација размене саобраћаја, контролних порука, алокације таласних дужина и трајања временских слотова и времена спавања ONU јединица у оквиру EE-DWPBA алгоритма за алокацију пропусног опсега .....	48
Слика 5.7: Визуелно поређење времена спавања, трајања активних режима ONU јединица и неалоцираних пропусних опсега EE WDM EPON-у применом EE-FWPBA и EE-DWPBA алгоритма.....	50
Слика 5.8: Илустрација размене саобраћаја, контролних порука, алокације таласних дужина и трајања временских слотова и времена спавања ONU јединица у оквиру EE-DWPBA-ASC алгоритма за алокацију пропусног опсега .....	53
Слика 5.9: Илустрација додатно унешеног кашњења пакета узрокованог баферисањем саобраћаја ка кориснику у EE WDM EPON систему а) без адаптивног циклуса спавања и б) са адаптивним циклусом спавања.....	55
Слика 5.10: Проширења структура контролних MPCP порука ради подршке EE WDM EPON систему – а) проширење GATE поруке и б) проширење REGISTER_REQ поруке.....	56
Слика 6.1: Приказ резултата добијених симулацијама EE-FWPBA алгоритма у зависности од циклуса спавања: а) минимално време спавања ONU јединица, б) средње и максимално додатно унешено кашњење пакета у смеру ка кориснику и в) неалоцирани пропусни опсег у систему и максимална заузетост неког од нових бафера у OLT-у.....	65
Слика 6.2: Приказ резултата добијених симулацијама EE-DWPBA алгоритма у зависности од циклуса спавања: а) минимално време спавања ONU јединица, б) средње и максимално додатно унешено кашњење пакета у смеру ка кориснику и в) неалоцирани пропусни опсег у систему .....	68
Слика 6.3: Заједнички приказ резултата симулација EE WDM EPON система у виду хексагона ради лакшег поређења укупних перформанси EE-FWPBA и EE-DWPBA алгоритма .....	71
Слика 6.4: Додатно унешена кашњења пакета EF класе саобраћаја за <i>Offline</i> и <i>Online</i> EE-DWPBA алгоритме [32] .....	73
Слика 6.5: Расподела додатно унешеног кашњења у симулацијама са EE-DWPBA-ASC алгоритмом за пакете EF класе саобраћаја у зависности од параметра <i>K</i> .....	75
Слика 6.6: Заједнички приказ резултата симулација EE WDM EPON система у виду хексагона ради лакшег поређења укупних перформанси <i>online</i> и <i>offline</i> EE-DWPBA алгоритма.....	76

# Списак табела

Табела 6.1: Вредности улазних параметара коришћене у симулацијама ЕЕ WDM EPON система .....	61
Табела 6.2: Параметри корисничких сервиса имплементираних у симулацијама и њихова класификација по класама сервиса .....	62
Табела 6.3: Пакети сервиса дефинисани у симулацијама и сервиси унутар њих .....	62
Табела 6.4: Резултати симулација ЕЕ WDM EPON система са ЕЕ-FWPBA алгоритмом .....	64
Табела 6.5: Резултати симулација ЕЕ-FWPBA алгоритма разврстани по сервисима одабраних корисника за циклус спавања 5 ms .....	65
Табела 6.6: Резултати симулација ЕЕ-FWPBA алгоритма разврстани по сервисима одабраних корисника за циклус спавања 10 ms .....	66
Табела 6.7: Резултати симулација ЕЕ-FWPBA алгоритма разврстани по сервисима одабраних корисника за циклус спавања 20 ms .....	66
Табела 6.8: Резултати симулација ЕЕ-FWPBA алгоритма разврстани по сервисима одабраних корисника за циклус спавања 50 ms .....	67
Табела 6.9: Резултати симулација ЕЕ WDM EPON система са ЕЕ-DWPBA алгоритмом .....	68
Табела 6.10: Резултати симулација ЕЕ-DWPBA алгоритма разврстани по сервисима одабраних корисника за циклус спавања 5 ms .....	69
Табела 6.11: Резултати симулација ЕЕ-DWPBA алгоритма разврстани по сервисима одабраних корисника за циклус спавања 10 ms .....	69
Табела 6.12: Резултати симулација ЕЕ-DWPBA алгоритма разврстани по сервисима одабраних корисника за циклус спавања 20 ms .....	70
Табела 6.13: Резултати симулација ЕЕ-DWPBA алгоритма разврстани по сервисима одабраних корисника за циклус спавања 50 ms .....	70
Табела 6.14: Резултати симулација ЕЕ WDM EPON система са <i>offline</i> и <i>online</i> ЕЕ-DWPBA алгоритмом у условима оптерећеног рада мреже .....	72
Табела 6.15: Додатно унесена кашњења пакета, неактивност ONU јединица, циклуси спавања и количина неалоцираног пропусног опсега за различите вредности параметра <i>K</i> у ЕЕ-DWPBA-ASC алгоритму .....	74
Табела 6.16: Резултати симулација 10G ЕЕ WDM EPON система .....	77

# Индекс скраћеница

ADSL - Asymmetric Digital Subscriber Line

AF - Assured Forwarding

ALR - Adaptive Link Rate

APON - ATM PON

ATM - Asynchronous Transfer Mode

AWG - Arrayed Waveguide Gratings

BE - Best Effort

BPON - Broadband PON

CBR - Constant Bit Rate

CN - Core Network

CRC - Cyclic Redundancy Check

DBA - Dynamic Bandwidth Allocation

DF - Default Forwarding

DTB - Downstream Burst Transmission

DWA - Dynamic Wavelength Algorithm

DWPBA - Dynamic Wavelength Priority Bandwidth Allocation

DWPBA-FS - Dynamic Wavelength Priority Bandwidth Allocation with Fine Scheduling

EE-DBA - Energy-Efficient Dynamic Bandwidth Allocation

EE-DWPBA - Energy-efficient Dynamic Wavelength Priority Bandwidth Allocation

EE-DWPBA-ASC - Energy-efficient Dynamic Wavelength Priority Bandwidth Allocation with Adaptive Sleep Cycle

EE-FWPBA - Energy-efficient Fixed Wavelength Priority Bandwidth Allocation  
EE WDM EPON - Energy Efficient Wavelength Division Multiplexing EPON  
EF - Expedited Forwarding  
EPON - Ethernet Passive Optical Networks  
FBA - Fixed Bandwidth Allocation  
FCS - Frame Check Sequence  
FWPBA - Fixed Wavelength Priority Bandwidth Allocation  
FSAN - Full Service Access Network  
FTTB - Fiber To The Building  
FTTC - Fiber To The Curb/Cabinet  
FTTH - Fiber To The Home  
GBA - Green Bandwidth Algorithm  
GPON - Gigabit-capable PON  
GR-ONU - Green Optical Network Unit  
HDTV - High Definition Television  
IPTV - Internet Protocol Television  
ITU - International Telecommunications Union  
ISP - Internet Service Provider  
KPI - Key Performance Indicators  
LASA - Load Adaptive Sequence Arrangement  
LASA-FMT - Load Adaptive Sequence Arrangement - Fixed Minimal Transmission time  
L-ONU - Legacy Optical Network Unit  
MAC - Media Access Control  
MPCP - Multi-Point Control Protocol  
MSD-PON - Multi-Scheduling Domain PON  
MST - Minimum Sleep Time  
NG-ONU - Next Generation Optical Network Unit  
NG-PON - Next-Generation Passive Optical Network  
ODN - Optical Distribution Network  
OECD - Organisation for Economic Co-operation and Development  
OFDMA-PON - Orthogonal Frequency Division Multiple Access PON  
OLT - Optical Line Terminal  
ONU - Optical Network Unit



OSU - Optical Subscriber Unit  
P2MP - Point-to-Multi-Point  
PC - Personal Computer  
PON - Passive Optical Network  
PSTN - Public Switched Telephone Network  
QoS - Quality of Service  
RAM - Random-Access Memory  
RTT - Round-Trip Time  
SDBA - Sleep-aware Dynamic Bandwidth Allocation  
SDTV - Standard Definition Television  
SIEPON - Service Interoperability EPON  
SLA - Service-Level Agreement  
SMA - Sleep Mode Aware  
SOA - Semiconductor Optical Amplifier  
SSD-PON - Single-Scheduling Domain PON  
STB - Set-Top Box  
STD-ONU - Standard Optical Network Unit  
TDM - Time Division Multiplexing  
TWDM - Time- and Wavelength-Division Multiplexing  
UC - Upstream Centric  
UDC - Upstream and Downstream Centric  
UHDTV - Ultra-High Definition Television  
VA - Void Aware  
VBR - Variable Bit Rate  
VDSL - Very high-speed Digital Subscriber Line  
VoD - Video on Demand  
VoIP - Voice over Internet Protocol  
WA-PON - Wavelength-Agile PON  
WFQ - Weighted Fair Queuing  
WiFi - Wireless Fidelity  
XG-PON - 10 Gigabit-capable PON  
XGS-PON - 10 Gigabit-capable Symmetric PON

# Биографија аутора

Рођен 3. 12. 1986. год. у Сарајеву, Босна и Херцеговина. Завршио Електротехничку школу „Никола Тесла“ у Београду, смер телекомуникације. Дипломирао на Електротехничком факултету у Београду, Одсек за телекомуникације и информационе технологије – смер Системско инжењерство, 2009. године, одбраном дипломског рада „Симулациона анализа линеарних блок кодова погодних за канале који се могу описати Марковљевим моделима“ са оценом 10 (десет) код проф. др Предрага Иваниша. Просечна оцена на основним академским студијама је 9.13. Мастер студије, модул Системско инжењерство и радио комуникације, завршио на истом факултету 2011. године одбраном мастер рада „Софтверска имплементација система за дигитално потписивање са хеш функцијама и алгоритмима с јавним кључем” са оценом 10 (десет), код ментора проф. др Предрага Иваниша. Просечна оцена на дипломским академским студијама је 9.67. Докторске студије на Електротехничком факултету у Београду, модул Наноелектроника и фотоника, уписује школске 2011/2012 године. Тренутна просечна оцена положених испита на докторским студијама је 10. Од 2011. године је запослен у ИРИТЕЛ а.д. у Сектору за оптичке системе преноса као дизајнер хардвера, област телекомуникације. У јуну 2018. године у оквиру сектора распоређен је на функцију Руководилац пројекта. Радио на развоју Ирител-овог OTN (*Optical Transport Network*) система (OT10G), на пословима који су се кретали од идејних решења до реализације и производње. Био је активно укључен и водио је одређене делове пројекта развоја оптичких транспортних CWDM система CWDM-8s и CWDM-10G, као и новог ИРИТЕЛ ROADM система који је у финалној фази развоја. У оквиру радних дужности спада и ангажовање на пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја TP32007 „Мултисервисна оптичка транспортна платформа OTN10/40/100 Gbps са DWDM/ROADM и *Carrier Ethernet* функционалностима“. Пре доласка у Ирител стекао две године стажа и радног искуства радећи у струци најпре у „Универзијада Београд 2009“ на позицији инжењер за ИТ мреже, а потом у „СПЦ системске интеграције“ на позицији Развојни инжењер – систем администратор. Због постигнутих резултата током школовања добија стипендије Града Београда и Фонда за младе таленте Републике Србије. Аутор/коаутор је три рада публикована у међународним часописима са SCI листе, једног рада у међународном часопису, седам радова представљених на међународним скуповима, једног рада у часопису националног значаја, шест радова представљених на скуповима националног значаја и једанаест лабораторијских прототипова, индустријских прототипова и нових производа.

# Библиографија проистекла из рада на докторској дисертацији

1. B. Pajčin, P. Matavulj, M. Radivojević, “Simulation analysis of energy efficient WDM Ethernet Passive Optical Network”, PHOTONICA2015 - V international school and conference on photonics, Belgrade, Serbia, P.OC.3, pp. 161, (8/2015)
2. Б. Пајчин, П. Матавуљ, М. Радивојевић, “Уштеде енергије у оптичким WDM EPON мрежама које користе 1Gb/s и 10Gb/s примопредајнике”, INFOTEH-JAHORINA Vol. 15, pp. 290-294, (3/2016)
3. B. Pajčin, P. Matavulj, M. Radivojević, “Simulation analysis of energy efficient WDM ethernet passive optical network”, DOI 10.1007/s11082-016-0572-4, Optical and Quantum Electronics 48:313 (2016)
4. B. Pajčin, P. Matavulj, M. Radivojević, “MPCP adjusting for improving QoS in Green WDM EPON”, 6th International Workshop on Fiber Optics in Access Networks – FOAN 2016, Lisbon – Portugal, pp. 29-34 (10/2016)
5. B. Pajčin, P. Matavulj, M. Radivojević, “Benefits of implementing online Dynamic Bandwidth Allocation algorithm in energy efficient WDM EPON”, PHOTONICS WORKSHOP – 10th Workshop, Kopaonik, Serbia, (2/2017)
6. B. Pajčin, P. Matavulj, M. Radivojević, “How long can ONU be inactive in four-wavelengths model of WDM Ethernet Passive Optical Network”, INFOTEH-JAHORINA, Jahorina, RS, B&H, Vol. 16, Ref. KST-2-5, pp. 207-210, (3/2017)
7. B. Pajčin, P. Matavulj, M. Radivojević, “Improving Quality of Service in four-channel WDM Ethernet Passive Optical Network”, PHOTONICA2017 – The Sixth International School and Conference on Photonics, Belgrade, Serbia, P.OC.4, pp. 148, (8/2017)
8. B. Pajčin, P. Matavulj, M. Radivojević, “What does mean adaptive sleep cycle in energy efficient optical access network?”, 7th International Workshop on Fiber Optics in Access Networks – FOAN 2017, Munich, Germany, pp. 31-35, (11/2017)
9. B. Pajčin, P. Matavulj, M. Radivojević, “Improving quality of service in four-channel WDM ethernet passive optical network”, DOI 10.1007/s11082-018-1637-3, Optical and Quantum Electronics 50:371 (2018)

10. B. Pajčin, P. Matavulj, M. Radivojević, “Analysis of Online DBA Algorithm with Adaptive Sleep Cycle in WDM EPON”, DOI 10.1080/01468030.2018.1455928, Fiber and Integrated Optics, Vol. 37, Issue 3, pp. 171-184, (4/2018)

## Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Бојан Пајчин

Број индекса 2011/5020

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Енергетски ефикасне етернет пасивне оптичке мреже базиране на мултиплексирању по таласним дужинама

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

У Београду, 27.09.2021.

Потпис аутора

Бојан Пајчин

## Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Бојан Пајчин

Број индекса 2011/5020

Студијски програм Наноелектроника и фотоника

Наслов рада Енергетски ефикасне етернет пасивне оптичке мреже базиране на мултиплексирању по таласним дужинама

Ментор др Петар Матавуљ, редовни професор

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, 27.09.2021.

Бојан Пајчин

## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Енергетски ефикасне етернет пасивне оптичке мреже базиране на мултиплексирању по таласним дужинама

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

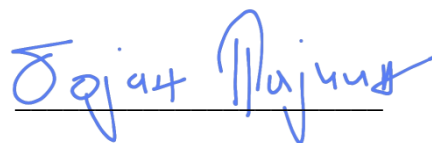
1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.

Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

У Београду, 27.09.2021.

Потпис аутора

  
Bojan Rajcic

1. **Ауторство.** Дозвољава те умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољава те умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољава те умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољава те умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољава те умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољава те умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.