

# Algoritam za implementaciju multipleksiranja po talasnim dužinama u EPON mreži

Mirjana R. Radivojević, Petar S. Matavulj

**Abstract** — Implementacija multipleksiranja po talasnim dužinama u Ethernet pasivnoj optičkoj mreži (EPON) danas se smatra jednim od najperspektivnijih rešenja za problem zagušenja u pristupnoj mreži. S obzirom na pojavu i razvoj novih servisa, pre svega multimedijalnih aplikacija, problem implementacije kvaliteta servisa (QoS), kao i u EPON mreži pre toga, dobija sve više na značaju i u WDM EPON sistemima. U ovom radu ćemo predstaviti i analizirati arhitekturu WDM EPON mreže i algoritam za dinamičku alokaciju talasnih dužina i propusnog opsega koji u potpunosti podržava implementaciju kvaliteta servisa. Pored teorijske analize u radu su predstavljeni rezultati simulacije kojima se potvrđuje efikasnost predloženog rešenja.

**Keywords** —DWBA algoritam, kvalitet servisa, WDM EPON.

## I. UVOD

Poslednjih godina EPON mreža je razmatrana kao jedno od optimalnih rešenja za problem nedostatka propusnog opsega u pristupnoj mreži. Međutim, EPON mreža je jednokanalni (*single-channel*) sistem u kome potencijal optičkog vlakna nije u potpunosti iskorišćen. Sa pojavom novih servisa propusni opseg koji može da pruži EPON mreža više nije dovoljan da bi se ispunili svi zahtevi krajnjih korisnika. Uvođenje multipleksiranja po talasnim dužinama, odnosno WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) tehnologije u EPON mrežu predstavlja logičan korak u razvoju pristupnih optičkih mreža. Međutim, aplikacije kao što su televizija visoke rezolucije, video konferencija i mnoge druge zahtevaju implementaciju kvaliteta servisa u WDM EPON mrežama kao što je bio slučaj i sa klasičnim EPON sistemima [1].

U ovom radu predstavimo i analiziramo model za alokaciju talasnih dužina i propusnog opsega u WDM EPON mreži - FWPBA (*Fixed Wavelength Bandwidth Priority Allocation*) model. Pored analize modela biće predstavljeni i objašnjeni rezultati simulacija kako bi se potvrdila efikasnost predloženog modela.

## II. ARHITEKTURA SISTEMA I FWPBA MODEL

Predložena WDM EPON arhitektura je u stvari klasična EPON arhitektura u kojoj su krajnji korisnici preko optičkih mrežnih jedinica ONU (*Optical Network Unit*)

povezani na centralni optički terminal OLT (*Optical Terminal Unit*). Za razliku od klasičnog EPON sistema koji podržava samo dve talasne dužine (jednu za *downstream* prenos od OLT do ONU jedinica i drugu za *upstream* prenos od ONU do OLT jedinice), u FWPBA modelu uvodimo podršku za prenos saobraćaja korišćenjem četiri talasne dužine:  $\lambda_0$ ,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  i  $\lambda_3$ .

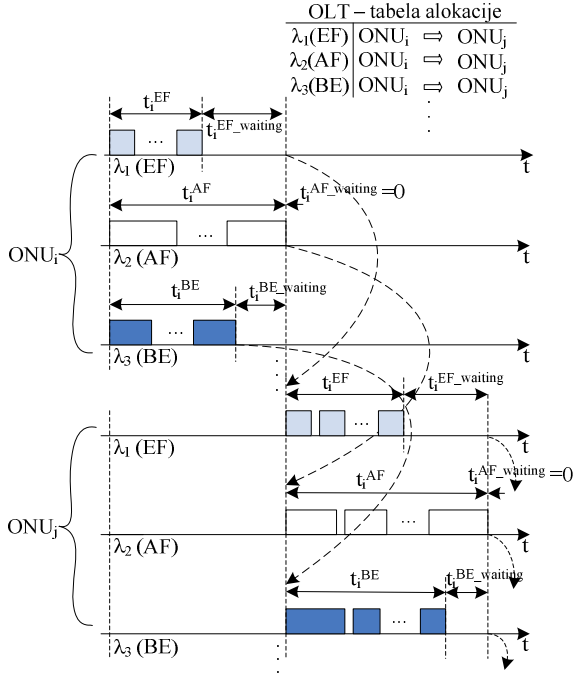
Podrška za implementaciju kvaliteta servisa u sistemu se realizuje kroz podršku za *Diffserv* arhitekturu u okviru koje se saobraćaj u sistemu deli u tri klase [2]: EF (*Expedite Forwarding*) – najveći prioritet za servise koji su osetljivi na kašnjenje (prenos glasa) i koje tipično karakteriše konstantna bitska brzina CBR (*Constant Bit Rate*); AF (*Assured Forwarding*) – srednji nivo prioriteta za saobraćaj koji nije osetljiv na kašnjenje (video aplikacije) i koji ima promenljivu bitsku brzinu VBR (*Variable Bit Rate*) i BE (*Best Effort*) – najniži prioritet za servise koji nisu osetljivi na kašnjenje, kao što su *web browsing*, transfer fajlova i *e-mail* aplikacije. U FWPBA modelu tri talasne dužine su rezervisane za prenos podataka na sledeći način:  $\lambda_1$  za EF,  $\lambda_2$  za AF i  $\lambda_3$  za BE saobraćaj. Četvrta talasna dužina ( $\lambda_0$ ) je rezervisana za prenos kontrolnih poruka i sinhronizaciju i može biti originalna talasna dužina korišćena u EPON mreži ili neka druga talasna dužina, [3]. Predlažemo da se ova talasna dužina definiše iz C-opsega s obzirom da oprema različitih proizvođača podržava ovaj opseg. Pored toga, da bi se realizovao istovremeni prenos saobraćaja po različitim talasnim dužinama u OLT i ONU jedinicama potrebno je koristiti primopredajnike fiksnih talasnih dužina (*fixed-tuned*).

U predloženom modelu komunikacija između OLT i ONU jedinica se kontroliše kroz implementaciju proširenog MPCP (*MultiPoint Control Protocol*) protokola, [3]. MPCP GATE poruka sada je proširena sa poljem od jednog bajta u koje se upisuje identifikator talasne dužine koju OLT jedinica dodeljuje datoj ONU jedinici za prenos podataka. Naime, raspodela resursa u WDM EPON mreži se više ne sastoji samo od alokacije propusnog opsega (*grant sizing*) već i od alokacije talasnih dužina (*grant scheduling*), [3]. U *downstream* smeru OLT jedinica korišćenjem emisionog mehanizma šalje podatke ka ONU jedinicama istovremeno, na više različitih talasnih dužina, koje one primaju na osnovu određene MAC adrese (kao i u klasičnoj EPON mreži [4]). S obzirom da je u FWPBA modelu napravljena fiksna veza između tipa saobraćaja i talasne dužine koja se koristi za njen prenos, a koja je poznata i OLT jedinici, alokacija talasne dužine nije potrebna čime je sam algoritam efikasniji. Sada, svaka ONU jedinica generisanjem REPORT MPCP kontrolne poruke šalje ka OLT jedinici zahtev za određenom

M.R. Radivojević, Računarski fakultet, Univerzitet Union, Knez Mihailova 6, 11000 Beograd, Srbija (telefon: 381-11-2627-613; e-mail: [mradojevic@raf.edu.rs](mailto:mradojevic@raf.edu.rs)).

P.S. Matavulj, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija (e-mail: [matavulj@etf.rs](mailto:matavulj@etf.rs)).

količinom propusnom opsega, nezavisno po svakoj talasnoj dužini. Kada primi REPORT poruke od svih ONU jedinica, DBA (*Dynamic Bandwidth Allocation*) modul za alokaciju propusnog opsega u OLT jedinici, vrši preraspodelu propusnog opsega za svaku klasu saobraćaja u svakoj ONU jedinici. U svakom ciklusu za prenos podataka jedna ONU jedinica vrši *upstream* prenos (prenos od korisnika) na sve tri talasne dužine istovremeno i zadržava sve tri dok se na svakoj od njih ne završi prenos pojedinih klasa saobraćaja. Kada se na svim talasnim dužinama završi prenos ONU jedinica oslabada sve tri talasne dužine za prenos podataka i OLT jedinica ih dodeljuje sledećoj ONU jedinici, Sl. 1.

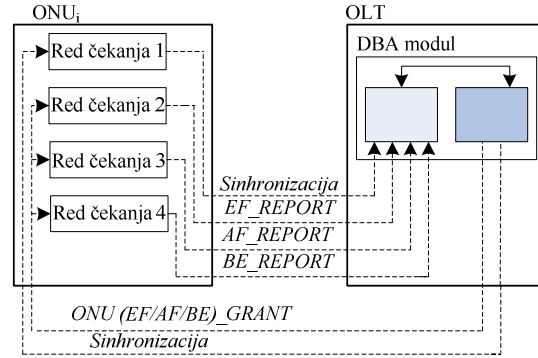


Sl. 1. *Upstream* ONU prenos

U ovom algoritmu talasne dužine koje prenose manju količinu saobraćaja moraju da čekaju da najopterećenija talasna dužina završi prenos čime se u sistem uvodi novo vreme čekanja,  $t_{waiting}^{waiting}$ . Radi analize, u nastavku rada pretpostavljamo da je AF klasa najzastupljenija u sistemu s obzirom na nagli razvoj multimedijalnih aplikacija [5]. Očigledno je da u ovom slučaju za AF klasu neće postojati vreme čekanja jer je ona najzastupljenija i diktiraće trajanje ciklusa za prenos. S obzirom da jedna ONU jedinica zadržava sve talasne dužine sve dok se po najopterećenijoj ne završi prenos, modul za alokaciju propusnog opsega svakoj ONU jedinici dodelje istu količinu raspoloživog *upstream* propusnog opsega na osnovu maksimalno zahtevanog propusnog opsega tj. generiše jednu GRANT MPCP poruku sa odobrenom količinom propusnog opsega za sve tri klase saobraćaja, Sl. 2. Ovakav algoritam pojednostavljuje i skraćuje vreme procesiranja u OLT jedinici, ali uvodi novu neefikasnost u sistem – neiskorišćen propusni opseg na dve manje opterećene talasne dužine.

Algoritam za alokaciju propusnog opsega korišćen u modelu je baziran na modifikovanom *gated* IPACT

algoritmu [6]. U ovom algoritmu svakoj ONU jedinici se odobrava zahtevana količina propusnog opsega koja ne



Sl. 3. OLT – ONU komunikacija

može biti veća od veličine reda čekanja. S obzirom da u sistemu ne pretpostavljamo da su sve ONU jedinice podjednako opterećene model modifikujemo sa uvođenjem težinskih faktora za svaku ONU jedinicu koji definiše njen udeo u raspodeli propusnog opsega.

Ukupan raspoloživ *upstream* propusni opseg može da se izračuna kao :

$$W^{total} = R * (T_{cycle}^{max} - T_g) \quad (1)$$

gde je R je brzina prenosa podataka unutar svakog kanala,  $T_g$  je *guard* interval koji razdvaja prenos različitih ONU jedinica,  $T_{cycle}^{max}$  je maksimalna veličina ciklusa za prenos podataka u kome svaka ONU jedinica treba da dobije šansu za prenos podataka i određena je MTCT (*Maximum Transmission Cycle Time*) parametrom. Alocirani propusni opseg se sada računa kao:

$$W_i^{ONU\_requested} = \max \{W_i^{EF\_requested}, W_i^{AF\_requested}, W_i^{BE\_requested}\} \quad (2)$$

$$W_{total}^{ONU\_requested} = \sum_{i \in N} W_i^{ONU\_requested} \quad (3)$$

$$W_i = \frac{W_i^{ONU\_requested}}{W_{total}^{ONU\_requested}} \quad (4)$$

$$W_i^{ONU\_allocated} = \begin{cases} W_i * W^{total}, & W_i^{ONU\_requested} < W^{queue} \\ W^{queue}, & W_i^{ONU\_requested} \geq W^{queue} \end{cases} \quad (5)$$

$$W_i^{ONU\_allocated} = W_i^{EF\_allocated} = W_i^{AF\_allocated} = W_i^{BE\_allocated} \quad (6)$$

pri čemu je:

- $N$  Ukupan broj ONU jedinica ONU;
- $w_i$  Težinski faktor dodeljen ONU<sub>i</sub>, pri čemu je  $\sum_{i=1}^N w_i = 1$ ;
- $W_i^{ONU\_requested}$  Zahtevani propusni opseg u ONU<sub>i</sub>;
- $W_{total}^{ONU\_requested}$  Ukupan zahtevani propusni opseg svih ONU jedinica u sistemu;
- $W_i^{EF\_requested}$  Zahtevani propusni opsega za EF klasu saobraćaja u ONU<sub>i</sub>;
- $W_i^{AF\_requested}$  Zahtevani propusni opsega za AF klasu saobraćaja u ONU<sub>i</sub>;
- $W_i^{BE\_requested}$  Zahtevani propusni opsega za BE klasu saobraćaja u ONU<sub>i</sub>;
- $W_i^{ONU\_allocated}$  Alocirani propusni opsega za ONU<sub>i</sub>;

$W_i^{EF\_allocated}$	Alociran propusni opsega za EF klasu saobraćaja u ONU <sub>i</sub> ;	$W_i^{EF\_unused}$	Neiskorišćen deo propusnog opsega alociran za prenos EF saobraćaja u ONU <sub>i</sub> ;
$W_i^{AF\_allocated}$	Alociran propusni opsega za AF klasu saobraćaja u ONU <sub>i</sub> ;	$W_i^{AF\_unused}$	Neiskorišćen deo propusnog opsega alociran za prenos AF saobraćaja u ONU <sub>i</sub> ;
$W_i^{BE\_allocated}$	Alociran propusni opsega za BE klasu saobraćaja u ONU <sub>i</sub> ;	$W_i^{BE\_unused}$	Neiskorišćen deo propusnog opsega alociran za prenos BE saobraćaja u ONU <sub>i</sub> ;
$W_{queue}$	Maksimalno definisana veličina reda čekanja.	$W_i^{ONU\_unused}$	Neiskorišćen propusni opseg alociran ONU <sub>i</sub> .

### III. ANALIZA FWPBA MODELA

Kao što je prethodno objašnjeno, u FWPBA modelu jedna talasna dužina se uvek koristi za prenos istog tipa saobraćaja i ne može biti dodeljena drugoj ONU jedinici sve dok se ne završi kompletan prenos po svim talasnim dužinama u posmatranoj ONU jedinici. Na ovaj način se u sistem uvodi novo vreme čekanja  $t_i^{waiting}$ , Sl. 1. Kašnjenje u okviru ONU<sub>i</sub> jedinice može se izraziti kao:

$$t_i^{ONU} = \max \{t_i^{EF}, t_i^{AF}, t_i^{BE}\} \quad (7)$$

$$t_i^{EF\_waiting} = t_i^{ONU} - t_i^{EF} \quad (8)$$

$$t_i^{AF\_waiting} = t_i^{ONU} - t_i^{AF} \quad (9)$$

$$t_i^{BE\_waiting} = t_i^{ONU} - t_i^{BE} \quad (10)$$

gde je:

$t_i^{ONU}$	Vreme procesiranja u ONU <sub>i</sub> ;
$t_i^{EF}$	Vreme prenosa EF saobraćaja u ONU <sub>i</sub> ;
$t_i^{AF}$	Vreme prenosa AF saobraćaja u ONU <sub>i</sub> ;
$t_i^{BE}$	Vreme prenosa BE saobraćaja u ONU <sub>i</sub> .

Na osnovu jednačina (7) - (10) zaključuje se da najopterećenija talasna dužina, odnosno najviše zastupljena klasa saobraćaja, neće imati vreme čekanja. Kao što smo prethodno pretpostavili, u skladu sa razvojem servisa i aplikacija AF klasa saobraćaja je danas najzastupljenija u pristupnim mrežama, dok se količina BE saobraćaja smanjuje, [5]. Iz ovoga zaključujemo da će vreme čekanja biti dominantno za EF klasu saobraćaja, a u manjoj meri za BE klasu.

S obzirom da algoritam za alokaciju propusnog opsega alocira isti propusni opseg svim klasama saobraćaja na osnovu maksimalnog zahteva, jedan deo alociranog propusnog opsega neće biti u potpunosti iskorišćen. Sa druge strane OLT jedinica je rasterećenija i procesiranje je brže, ali će propusni opseg biti u potpunosti iskorišćen samo na maksimalno opterećenoj talasnoj dužini. Neiskorišćeni propusni opseg za svaku klasu saobraćaja se računa kao:

$$W_i^{EF\_unused} = W_i^{ONU\_allocated} - W_i^{EF\_requested} \quad (11)$$

$$W_i^{AF\_unused} = W_i^{ONU\_allocated} - W_i^{AF\_requested} \quad (12)$$

$$W_i^{BE\_unused} = W_i^{ONU\_allocated} - W_i^{BE\_requested} \quad (13)$$

$$W_i^{ONU\_unused} = W_i^{EF\_unused} + W_i^{AF\_unused} + W_i^{BE\_unused} \quad (14)$$

pri čemu je:

S obzirom da je AF saobraćaj najzastupljeniji u sistemu on u potpunosti koristi propusni opseg tj. za ovu klasu ne postoji neiskorišćen propusni opseg.

Prethodne kalkulacije vremena čekanja i neiskorišćenog propusnog opsega se koriste za procenu i numeričko predstavljanje efikasnosti FWPBA modela.

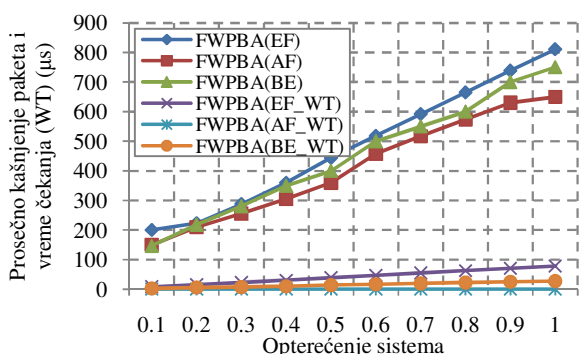
### IV. SIMULACIJA

Simulacija rada FWPBA modela realizovana je korišćenjem programa MATLAB i programskog paketa Simulink. Parametri korišćeni u simulaciji su sledeći: broj ONU jedinica je  $N = 16$ ; brzina prenosa podataka na svakoj talasnoj dužini je 1 Gbps; MTCT interval je 2 ms; *guard* interval je 1  $\mu$ s; opterećenje ONU jedinica varira između 0.1 i 1 tj. 10 i 100 Mbps; veličina bafera je 1 Mby. RTT (*Round Trip Time*) parametar se generiše u skladu sa uniformnom raspodelom iz opsega [100  $\mu$ s, 200  $\mu$ s], što odgovara rastojanju između OLT i ONU jedinica od 15 do 30 km. S obzirom da je EF saobraćaj uskopojasnog tipa pretpostavljeno je da on može zauzimati najviše 15%, AF saobraćaj 50% i BE saobraćaj 35% propusnog opsega, [5]. Za generisanje AF i BE saobraćaja koristi se model predstavljen u [7], dok se EF saobraćaj modeluje korišćenjem *Poisson*-ove raspodele sa fiksnom veličinom paketa od 70 by, [2].

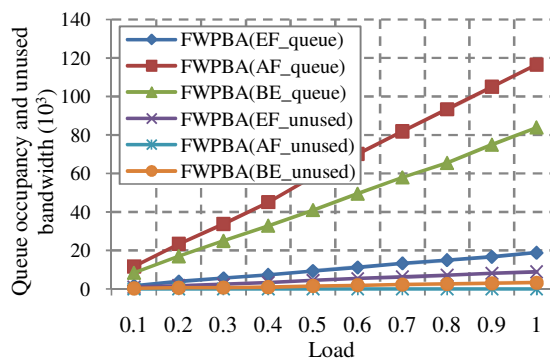
Na Sl. 3. je prikazano poređenje srednjeg vremena kašnjenja i komponente čekanja za svaku podržanu klasu saobraćaja. Rezultati potvrđuju zaključke dobijene teorijskom analizom modela iz prethodnog poglavlja. S obzirom da je EF saobraćaj najmanje zastupljen u sistemu komponenta čekanja ove klase saobraćaja je dominantna i on će imati najveće prosečno kašnjenje u sistemu. BE saobraćaj koji je zastupljeni ima nešto bolju karakteristiku kašnjenja, dok AF saobraćaj koji je u sistemu najviše zastupljen ima najbolju karakteristiku kašnjenja i nema komponentu čekanja. U slučaju maksimalno opterećenog sistema kašnjenje EF paketa je za 7.5% veće od kašnjenja BE paketa, a za 19.9% veće od kašnjenja AF paketa, Sl.3.

Dalja analiza opterećenja reda čekanja rezervisanog za svaku od podržanih klasa saobraćaja, kao što je i očekivano, pokazuje da je red čekanja u koji se smeštaju AF paketi najviše opterećen, zatim slede redovi čekanja za BE i EF saobraćaj, što u potpunosti odgovara raspodeli saobraćaja u sistemu, Sl.4. Na istoj slici je prikazana i količina neiskorišćenog propusnog opsega koji se u skladu sa matematičkim modelom dodeljuje svakoj klasi saobraćaja. Kao što je zaključeno teorijskom analizom komponenta neiskorišćenog propusnog opsega je dominantna za EF saobraćaj koji je najmanje zastupljen u sistemu, dok je za AF saobraćaj praktično anulirana.

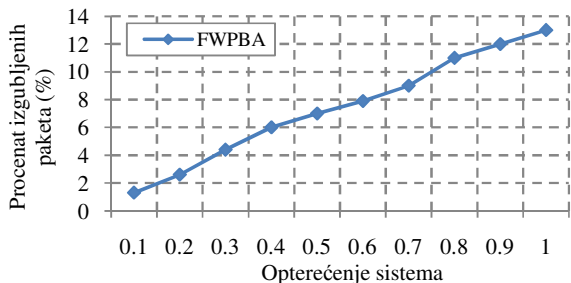
Procenat izgubljenih paketa u sistemu je veoma mali,



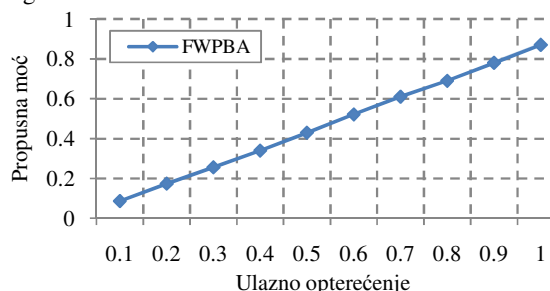
Sl. 3. Prosečno kašnjenje paketa i vreme čekanja (WT)



Sl. 4. Zauzetost redova čekanja i neiskorišćen propusni opseg



Sl. 5. Procenat izgubljenih paketa



Sl. 6. Propusna moć

kao što je prikazano na Sl. 5., što se objašnjava povećanom efikasnošću OLT jedinice usled efikasnijeg matematičkog modela i fiksne alokacije talasnih dužina. Ovo je dalje potvrđeno sa karakteristikom propusne moći sistema koja u slučaju najvećeg opterećenja sistema dostiže 87%, Sl. 6.

Rezultati dobijeni testiranjem WDM EPON modela pokazuju da su efikasnost i performanse sistema znatno poboljšane u odnosu na klasične EPON sisteme odnosno HG(PBS) algoritam, [1], [4]. Prezentovani rezultati pokazuju da se implementacijom FWPBA modela postižu značajna poboljšanja prosečnog kašnjenja AF paketa (14.5%), prosečnog kašnjenja BE paketa (25%), kao i procenta izgubljenih paketa (27.8%) u poređenju sa rezultatima predstavljenim u [1] i [4].

Predloženi FWPBA model optimizuje gubitak paketa i propusnu moć WDM EPON sistema, kao i kašnjenje AF saobraćaja koje je trenutno dominantno u pristupnoj mreži. Rezultati teorijske analize kao i simulacije pokazuju da je kašnjenje EF saobraćaja najveće zbog postojanja vremena čekanja, međutim to kašnjenje je manje od 1 ms što omogućava garantovanje kvaliteta servisa i za ovu klasu.

## V. ZAKLJUČAK

FWPBA model predložen u ovom radu omogućava dinamičku alokaciju propusnog opsega za različite klase servisa po različitim talasnim dužinama u WDM EPON mreži. Alokacija propusnog opsega je bazirana na algoritmu koji omogućava efikasniji rad i poboljšava sveukupne performanse sistema po svim merenim parametrima.

## LITERATURA

- [1] M. Radivojevic and P. Matavulj, "Implementation of Intra-ONU Scheduling for Quality of Service Support in Ethernet Passive

- Optical Networks," *Journal of Lightwave Technology*, vol.27, no.18, pp. 4055-4062, Sept. 2009.
- [2] S. Blake, D. Black, M. Carlson, E. Davies, Z. Wang, and W. Weiss, An Architecture for Differentiated Services, IETF, RFC 2475, Dec. 1998.
- [3] M. McGarry, M. Maier, M. Reisslein, and A. Keha, "Bandwidth management for WDM EPONs," *Journal of Optical Networking*, vol.5, no.9, pp. 637-654, Sept. 2006.
- [4] M. Radivojević and P. Matavulj, "Dinamička alokacija propusnog opsega u EPON mreži korišćenjem HG protokola," Zbornik radova TELFOR 2007, str. 425-428, Beograd, 2007.
- [5] F.J.Hens and J.M. Caballero, *Triple Play: Building the converged network for IP, VoIP and IPTV*, Valley, 2008.
- [6] G. Kramer and G. Pesavento, "Ethernet PON: Building a next-generation optical access network," *IEEE Communication Magazine*, vol. 40, no. 2, pp. 66-73, Feb. 2002.
- [7] W. Willinger, M. S. Taqqu, and A. Erramilli, "A bibliographical guide to self-similar traffic and performance modeling for modern high-speed networks," in *Stochastic Networks*. Oxford, U.K.: Oxford Univ. Press, 1996, pp. 339-366.

## ABSTRACT

Today, implementation of wavelength division multiplexing in Ethernet passive optical network (EPON) is considered as one of the most perspective solutions for the bottleneck problem in the access network. With development of new applications and services, multimedia applications above all, quality of service (QoS) support becomes a major concern in WDM EPON, as it was a case in EPON. In this work, WDM EPON architecture is presented along with a novel algorithm for wavelength and bandwidth allocation with full QoS support. Beside theoretical analysis, simulation results are presented and they confirm good performance of presented solution.

## ALGORITHM FOR IMPLEMENTATION OF WAVELENGTH DIVISION MULTIPLEXING IN EPON

Mirjana Radivojević, Petar Matavulj