

# Analiza i testiranje nove generacije pasivnih optičkih pristupnih mreža

Đorđe Petrović, Prof. Dr. Mirjana Radivojević<sup>1</sup>

*Sadržaj* – Razvoj interneta doživeo je značajan napredak, podstaknut globalnom digitalizacijom, razvojem mobilnog interneta, računarstva u oblaku i Interneta stvari. Ovi trendovi su značajno povećali potrebu za većim propusnim opsegom u svim segmentima računarskih sistema, od pristupnih mreža do osnovne (Core) mreže. U tom kontekstu, optičke pristupne mreže su se izdvojile kao optimalno rešenje zahvaljujući svojoj energetskej efikasnosti, ekonomskoj isplativosti, većoj sigurnosti i sposobnosti pružanja visokih brzina.

PON (*Passive Optical Network*) tehnologija koristi pasivne komponente, čime eliminiše potrebu za napajanjem u distributivnoj mreži, i omogućava deljenje jednog optičkog vlakna među više korisnika. Ovo čini PON mreže idealnim za implementaciju FTTH (*Fiber to the Home*) rešenja koja omogućavaju veće brzine i podršku za prenos različitih tipova saobraćaja. Međunarodna telekomunikaciona unija (ITU) i FSAN organizacija definišu standarde za pristupne mreže sledeće generacije kako bi zadovoljile sve veće kapacitete.

Efikasno upravljanje PON mrežama zahteva tehnologije poput optičkog reflektometra vremenskog domena (OTDR), koji omogućava preciznu dijagnostiku kvarova i lokalizaciju problema u mreži. Ovo je posebno važno za telekomunikacione operatere, jer omogućava razlikovanje kvarova na opremi od prekida optičkog vlakna i smanjuje troškove održavanja.

Cilj ovog rada je pružiti sveobuhvatan pregled PON mreža kroz analizu teorijskih koncepata i praktične primene. Rad sadrži pregled aktuelnih istraživanja i operativnih izazova vezanih za projektovanje i implementaciju pasivnih optičkih mreža, kao i detaljan opis opreme za testiranje. Takođe, rad analizira studiju slučaja implementacije FTTH mreža u Srbiji, sa fokusom na dizajn, tehnologije, protokole, testiranje i puštanje u rad.

**Ključne reči** – Internet stvari, Pristupne mreže, PtP, P2MP, AON, PON, Multipleksiranje, CO, OLT, ONT, ONU, GPON, XG-PON, XGS-PON NG-PON2, FTTH, OTDR, ACS sistem, SANTAND

---

<sup>1</sup> Đorđe Petrović, Računarski fakultet, Univerzitet Union, Knez Mihailova 6/6, Beograd, Srbija (e-mail: [dj.pet92@gmail.com](mailto:dj.pet92@gmail.com))

Prof. Dr. Mirjana Radivojević, Računarski fakultet, Univerzitet Union, Knez Mihailova 6/6, Beograd, Srbija (e-mail: [mradivojevic@raf.rs](mailto:mradivojevic@raf.rs))

## I. UVOD

U današnjem svetu, pristup internetu postaje neizostavan deo naše svakodnevne komunikacije, poslovanja i zabave. Kako se sve veći broj korisnika oslanja na brzi i pouzdani prenos podataka preko Internet mreže raste potreba za unapređenjem pristupnih mreža koje mogu obezbediti veću pouzdanost, brže povezivanje i veći kapacitet. Optičke pristupne mreže, koje koriste svetlosne signale za prenos podataka, postale su ključna tehnologija koja omogućuje velike brzine prenosa i pouzdane internet veze za rezidencijalne i poslovne korisnike [1]. Optičke pristupne mreže su evoluirale tokom godina, pružajući sve brže i učinkovitije rešenje za povezivanje korisnika s globalnom mrežom.

PON (*Passive Optical Network*) je jedan od tipova FTTx (*Fiber to the x*) rešenja, gde 'x' označava različite krajnje tačke do kojih se optička vlakna protežu. FTTx predstavlja skup tehnologija koje koriste optička vlakna za pružanje širokopojasnog pristupa. PON je specifična vrsta FTTx tehnologije koja se karakteriše pasivnim komponentama u mreži, što znači da između centralne jedinice i korisničkih uređaja nema aktivnih elektronskih uređaja. Ovaj koncept je ključan za razumevanje logike PON tehnologije, jer omogućava isporuku velike brzine prenosa podataka sa smanjenom potrebom za održavanjem i nižim operativnim troškovima. PON mreže koriste optička vlakna za direktno povezivanje korisnika sa centralnim telekomunikacionim čvorištima, što rezultira superiornim performansama u odnosu na tradicionalne bakarne i kablovske mreže.

Efikasno upravljanje i održavanje PON mreža zahteva napredne metode za praćenje performansi i otklanjanje kvarova. Jedna od ključnih tehnologija u ovom domenu je optički reflektometar vremenskog domena (OTDR), koji omogućava preciznu dijagnostiku i lokalizaciju problema u mreži. OTDR se koristi za merenje gubitaka, refleksija i ukupne dužine optičkih trasa, što je od suštinskog značaja za garantovanje kvaliteta usluge [2].

Cilj master rada je da pruži pregled pasivnih optičkih mreža kroz teorijsku i praktičnu analizu. U radu je predstavljen sistematičan pregled arhitekture pasivnih optičkih mreža, uključujući istraživačke teme, operativna pitanja, kao i smernice za projektovanje i implementaciju. Opisane su metode testiranja pomoću optičkih merača snage i analizirana optička snaga. Rad uključuje studiju slučaja implementacije FTTH mreža u Srbiji, sa osvrtom na konceptualni dizajn, tehnologije, protokole i postupke testiranja. Obradene su metodologije za izračunavanje budžeta snage i efikasnosti prenosa.

## II. PON MREŽE

Rastuća potražnja za integrisanim glasovnim, video uslugama i uslugama

podataka otvorila je put razvoju novih tehnika prenosa sa krajnjim ciljem ostvarenja širokopojasne pristupne mreže. PON mreže su jedna od alternativa koje se nude telekomunikacionim operatorima, omogućavajući isporuku visokobriznih interaktivnih usluga do domova [3]. Uvođenjem optičkih vlakana u pristupne mreže ove mreže se trenutno smatraju najekonomičnijim telekomunikacionim rešenjem.



Slika 1 Topologija optičkih pristupnih mreža [4]

Postoje nekoliko tipova topologija mreže za PON mreže, posebno PtP (*point-to-point*), AON (*Active Optical Network*) mreža i PON (*Passive Optical Network*) mreža, prikazano na slici 1.

U PtP strukturi, svaki korisnik je povezan sa CO (*Central Office*) putem para nezavisnih optičkih vlakana, a paketno prebacivanje se vrši u CO. Iako visoka propusnost sistema može biti zagarantovana ovim pristupom, praktična implementacija je skupa jer nema deljenja resursa, što znači da svaki korisnik mora pokriti punu cenu odgovarajućeg linka. U AON mreži, paketno prebacivanje je premešteno sa CO na udaljeni aktivni čvor blizu korisnika. Međutim, AON mreža zahteva dodatno napajanje za održavanje operacija prebacivanja zbog prisustva aktivnih uređaja u njenoj arhitekturi [5].

U novoj arhitekturi PON mreža aktivni prekidači su zamenjeni pasivnim optičkim deliocima snage (*splitter*). Ova promena eliminiše potrebu za dodatnim napajanjem na udaljenim čvorovima. Sada jedno optičko vlakno povezuje CO i korisničku stranu [6]. Kada se približimo područjima sa visokom koncentracijom korisnika, koristi se pasivni delilac kako bi se omogućila kratka povezanost sa korisničkom stranom. Ova arhitektura se naziva PtMP (*Point-to-Multipoint*) omogućava optimalno deljenje resursa.

### III. DEFINICIJA PON MREŽE

#### A. Koncept PON mreža

Kada je reč o PON mreži, PON rešenja/standardi predstavljaju tehnologiju optičke mreže koja obezbeđuje pružanje širokopojasnog pristupa internetu

korisnicima. Ovi standardi se karakterišu pasivnim optičkim komponentama koje ne zahtevaju napajanje duž optičkog vlakna. Uloga ovih standarda je da omogući efikasniji i brzi prenos podataka putem optičkih vlakana. Oni omogućavaju deljenje optičke infrastrukture između više korisnika, čime se smanjuju troškovi implementacije a samim tim i održavanja mreže.

Simetrični prenos podrazumeva da je brzina prenosa podataka ka korisniku (*downstream*) i od korisnika (*upstream*) ista. Ovaj tip prenosa je često poželjan u aplikacijama gde je jednaka količina podataka potrebna i u dolaznom i u odlaznom smeru, kao što su video konferencije. Asimetrični prenos znači da su brzine prenosa ka i od korisnika različite. Ovaj tip prenosa je uobičajen u kućnim mrežama gde korisnici preuzimaju mnogo više podataka (npr. *streaming* video sadržaja) nego što šalju (npr. *upload* slika ili video zapisa). Na primer, GPON standard nudi brzine prenosa od 2,5 Gbps ka korisniku i 1,25 Gbps od korisnika. Ovaj asimetrični odnos omogućava optimizaciju mreže pri čemu je veći naglasak stavljen na preuzimanje podataka [7].

Evolutivni razvoj PON standarda prošao je kroz nekoliko generacija kako bi zadovoljio sve veće zahteve za propusnošću po korisniku. Različite strategije nadogradnje su predložene od strane industrije, akademskih istraživačkih institucija i finalizovane od strane međunarodnih organizacija [8]. Dve glavne organizacije odgovorne za standardizaciju pasivnih optičkih mreža su IEEE (*Institute of Electrical & Electronics Engineers*) i ITU-T (*International Telecommunication Union - The Telecommunication Standardization Sector*). PON tehnologija je evoluirala tokom godina. ITU zajedno sa IEEE standardizovali su nekoliko dizajna kako bi zadovoljili različite zahteve u pogledu brzina prenosa u uzlaznom i silaznom pravcu, broja podele, dosega i protokola prenosa. BPON (*Broadband PON*), EPON (*Ethernet PON*) i GPON/XGPON (*Gigabit PON*) [3].

## B. Pasivne optičke komponente

Oprema za pasivnu optičku distributivnu mrežu ODN (*Optical Distribution Network*) obuhvata komponente koje se nalaze između optičkog linijskog terminala OLT (*Optical Line Terminal*) i korisničkih prostorija ONT (*Optical Network Terminal*), kao što je prikazano na slici 2. Ovo uključuje različite optičke komponente, kao što su spojevi (fuzioni i mehanički), konektori, razdelnici (*splitter*), WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) spojnice i optički kablovi.

Pasivne optičke komponente igraju ključnu ulogu u PON mreži, budući da im nije potreban spoljni izvor energije za obavljanje operacija ili transformaciju optičkog signala. Na primer, pasivni optički filter propušta samo određenu talasnu dužinu kroz sebe dok ostatak svetla apsorbira ili reflektuje, dok optički razdelnik deli svetlost koja ulazi u njega na dva ili više tokova optičke snage nižeg nivoa [10].

Aktivne komponente zahtevaju spoljnu energiju za obavljanje svojih funkcija

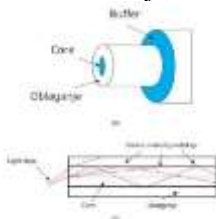
ili za korišćenje u širem operativnom domenu od pasivnih uređaja, što omogućava veću fleksibilnost. Međutim, ovi uređaji se obično ne koriste između krajnjih tačaka u PON mreži, osim unutar opreme na kraju mreže.



Slika **Error! No text of specified style in document.**2 Blok šema PON mreže [9]

### C. Optički kablovi

Optički kabl sačinjen od vlakana je ključni deo za povezivanje elemenata PON mreže. Svetlost se vodi niz jezgro (*core*) vlakna, okruženo optičkom oblogom koja koristi tehniku totalne unutrašnje refleksije da zadrži svetlost unutar jezgra. Vlakno je dodatno zaštićeno omotačem od plastike (*buffer*), koji služi da zaštiti od vlage i fizičkih oštećenja, videti na slici 3 [11].

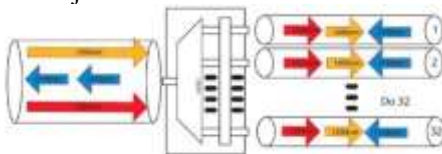


Slika3 (a) Izgled optičkog kabla; (b) Bočni pregled optičkog kabla [11]

Optička vlakna su sačinjena od stakla visoke čistoće. Optička vlakna se mogu klasifikovati kao jednomodna ili višemodna. Standardno jednomodno vlakno SMF (*Single-mode fiber*) ima mali prečnik jezgra od oko 10  $\mu\text{m}$  i zahteva visoku mehaničku preciznost za spajanje signala. S druge strane, višemodna vlakna MMF (*Multimode fiber*) imaju veće prečnike jezgra radi lakšeg poravnavanja i spajanja [2]. Višemodno vlakno omogućava svetlosti da putuje kroz jezgro u kroz više zrakova, nazvanih modovi. Ima veće jezgro koje podržava prenos više modova svetlosti. Sa druge strane, veće jezgro znači i veću mogućnost slabljenja signala na spojevima. Jednomodno vlakno ima mnogo manje jezgro, samo oko 9 mikrona, tako da svetlost putuje samo kao jedan zrak. Koristi se sa laserskim izvorima na 1300 i 1550 nm jer ima manje gubitke i praktično beskonačnu propusnost. Koristi se za prenose preko kičme na velike udaljenosti, dok se MMF koristi za lokalne građevinske veze [2].

### D. Spliteri

Optički splitteri su elementi u PON mrežama koji omogućavaju efikasno deljenje optičkog signala na više izlaza, bez potrebe za dodatnim izvorima napajanja ili aktivnom kontrolom. Njihova primarna funkcija je da omoguće distribuciju optičkog signala sa jednog ulaza na više izlaza, čime se omogućava povezivanje sa više korisničkih terminala ili uređaja. Ulazni (nizvodni) optički signal predstavlja podatke koji se prenose od CO ka korisnicima podeljen je između izlaznih portova pri čemu više korisnika deli jedno optičko vlakno i samim tim dele dostupnu propusnost dodeljenog vlakna. U smeru naviše dolazi do prenosa podataka od korisnika prema CO optički signal se prostire iz nekoliko ONU jedinica koji se kombinuju u jedno optičko vlakno. Prikaz dvosmernog splitera dat je na slici 5.



Slika 4 Dvosmerni 1xN PON spliter [11]

Oni su širokopojasni i samo dodaju gubitak, uglavnom zbog toga što dele ulaznu (nizvodnu) snagu. Ovaj gubitak, poznat kao gubitak razvodnika ili odnos razdvajanja, obično se izražava u dB i uglavnom zavisi od broja izlaznih priključaka. Ulazni optički signal se deli podjednako u kaskadu ili grane.

#### E. Konektori

Optički konektori se koriste za spajanje optičkih vlakana gde je potrebna mogućnost povezivanja i odvajanja. Krajevi vlakana dva konektora se pritiskaju zajedno, rezultirajući direktnim kontaktom stakla sa staklom ili plastike sa plastikom, izbegavajući bilo kakav kontakt stakla sa vazduhom ili plastike sa vazduhom, što bi rezultiralo većim gubicima konektora [11].



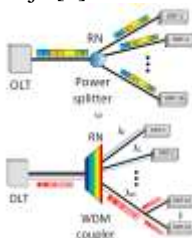
Slika 5 Simplex tip konektora [5]

#### F. Multipleksiranje

Pristupna PON mreža koristi PtMP strukturu, gde se nizvodni podaci emituju preko jednog vlakna do svake ONU jedinice. Da bi se ovo ostvarilo, podaci se moraju multipleksirati i spakovati u skladu sa određenim pravilima za prenos, a zatim demultipleksirati na strani korisnika. U uzvodnom smeru, podaci iz različitih ONU jedinica se kombinuju u isti dovodni kabl i šalju nazad do OLT uređaja. TDM (*Time Division Multiplexing*) i WDM (*Wavelength Division Multiplexing*) su najzastupljeniji oblici multiplexing tehnika koje se koriste u

PON mreži, videti sliku 7. Multiplexing tehnike zauzimaju značajan deo u formiranju arhitekture PON mreže [9].

TDM je kratica za "multipleksiranje po vremenskom rasporedu". To je tehnika koja omogućava više signala da se prenose preko jednog prenosnog kanala tako što se svaki signal šalje u određenom vremenskom intervalu. Na taj način se koristi isti kanal za prenos različitih signala, ali svaki signal ima svoj vremenski slot u kojem se emituje [6].



Slika 6 Arhitektura TDM-PON i WDM-PON rešenja [1]

Sa druge strane, WDM tehnika multipleksiranja po talasnim dužinama omogućava istovremeni prenos više nezavisnih kanala podataka kroz isto optičko vlakno, pri čemu se svakom kanalu dodeljuje određena talasna dužina svetlosti [12].

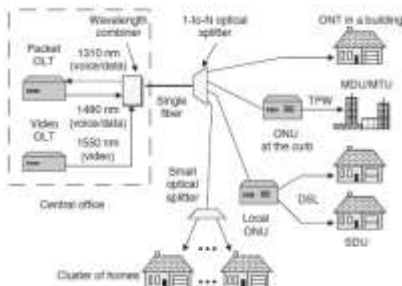
#### IV.DEFINICIJA I IMPLEMENTACIJA PON MREŽE

Gigabitna pasivna optička mreža GPON je evolucija BPON standarda, a standardizovana je serijom preporuka ITU-TG.984. X. GPON podržava veće brzine prenosa, povećanu sigurnost i veću efikasnost kod prenosa različitih usluga. Uobičajena brzina u dolaznom smeru je 2.488 Gbit/s, a u odlaznom smeru 1.244 Gbit/s. GPON se sastoji od OLT uređaja koji je obično smešten na centralnoj lokaciji CO i većeg broja ONT terminala koji se smeštaju kod korisnika. Moguće je koristiti i ONU jedinicu u slučajevima kombinacije sa ostalim pristupnim tehnologijama. Pomenute komponente GPON mreže predstavljaju aktivne komponente [10].

OLT je od vitalnog značaja za uspostavljanje, upravljanje i nadgledanje veza sa korisničkim terminalima. Njegove funkcije obuhvataju slanje i primanje podataka, upravljanje propusnošću mreže, osiguravanje kvaliteta usluge te nadgledanje i dijagnostiku mreže. Osim toga, OLT omogućava operaterima usluga da efikasno upravljaju i kontrolišu optičku mrežu, osiguravajući stabilnost, pouzdanost i sigurnost u distribuciji podataka ka korisničkim terminalima. Kroz centralizovanu kontrolu i upravljanje, OLT obezbeđuje neophodnu infrastrukturu za pružanje širokog spektra usluga korisnicima.

ONT terminal je smešten na korisničkoj strani optičke mreže. To je uređaj koji se instalira kod krajnjeg korisnika kako bi omogućio pretvaranje optičkog

signala u električni signal koji se može koristiti za povezivanje korisničke opreme, poput računara, telefona ili rutera [13].



Slika 8 Koncept PON mreže [9]

U ovoj PON arhitekturi, jednomodno optičko vlakno se proteže od CO do pasivnog optičkog splitera snage (1 do N) koji deli optičku snagu na N odvojenih putanja prema korisnicima. Dakle, ako je P optička snaga koja ulazi u idealni spliter, nivo snage koji ide ka svakom korisniku je  $P/N$ . Kapacitet splitera zavisi od primene i broj deljenih putanja može varirati od 2 do 128, ali tipično je 8, 16 ili 32. Iz optičkog splitera, pojedinačna jednomodna vlakna idu do svake zgrade ili do servisne opreme. U nekim slučajevima, mali optički spliter se nalazi na kraju ovog optičkog voda, a zatim kratki linkovi idu od tog mesta do pojedinačnih korisničkih prostora. Maksimalno optičko rastojanje od CO do krajnjeg korisnika obično je 20 km, iako ta vrednost može biti veća zavisno od korišćene ITU preporuke ili IEEE standarda. Na primer, ITU-T preporuke za GPON postavljaju maksimalni doseg od 20 km za odnos deljenja 1:64. Iz tog razloga aktivne komponente postoje samo u CO i na korisničkom kraju i moraju biti u mogućnosti da podrže pomenuti maksimalni doseg [13].

#### A. Budžet snage

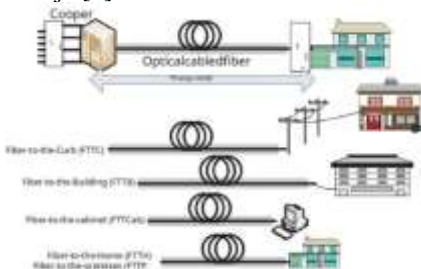
Budžet snage u GPON mreži odnosi se na maksimalni gubitak snage koji se može tolerisati tokom prenosa optičkog signala između OLT i ONT/ONU uređaja, uzimajući u obzir sve komponente optičke mreže, kao što su optička vlakna, spliteri, konektori i drugi pasivni i aktivni elementi [10].

Budžet snage definiše maksimalnu udaljenost kao i broj korisnika koji može biti obuhvaćen na optičkoj mreži bez prevelikog gubitka signala. Na primer, ako je budžet snage za GPON postavljen na 28 dB, to znači da ukupan gubitak signala od OLT uređaja do korisničke lokacije ne sme preći 28 dB kako bi se osiguralo pouzdano funkcionisanje mreže. Prekoračenje ovog limita može dovesti do smanjenja kvaliteta signala ili do potpunog gubitka signala [10].

#### B. Tipovi GPON mreže



Optičko vlakno do bilo kojeg mesta (*Fiber to the x*), označava svaku mrežnu arhitekturu koja s ciljem celokupne ili delimične zamene dela uobičajene bakarne lokalne petlje, koristi optička vlakna. Radi se o mrežnoj tehnologiji koja se deli na više optičkih mrežnih struktura. Postoje razne varijante ove vrste tehnologije, kao što su FTTH (*Fiber to the Home*) optika do doma), zatim FTTP (*Fiber to the Premises*) optika do poseda, FTTN (*Fiber to the Node*), optika do čvora, FTTC (*Fiber to the Curb/Cabinet*), optika do pločnika ili ormarića i FTTB (*Fiber to the building*), optika do zgrade. Slika 9 prikazuje tipove GPON mreže za implementiranje [1].



Slika 9 Varijacije arhitekture pristupne mreže [11]

Razlike među različitim strukturama tehnologije optičkih mreža uglavnom su uslovljene udaljenošću optičkih puteva od krajnjih korisnika, kao i procentom mreže koji se oslanja na optičke veze. Na primeru FTTN i FTTC razlika je suptilna, budući da se osnovna razlika bazira na udaljenosti optike od krajnjeg korisnika. Kod FTTC-a, optika se proteže do korisnika na udaljenosti manjoj od 300 metara, dok kod FTTN-a optički put do korisnika premašuje 300 metara.

FTTH podrazumeva da optički put ide od centralnog operatera do privatnog ili poslovnog prostora korisnika, preskačući strukture koje koriste fizičke medije umesto optičkih vlakana za poslednji deo pristupnog puta. FTTB dovodi optičko vlakno do granice privatnog ili poslovnog prostora, ali ne ulazi direktno u sam prostor. Umesto toga, komunikacija se nastavlja preko drugih fizičkih medija kao što su bežične veze ili bakarne žice.

Svaka od ovih šema ima različite zahteve za usluge u zavisnosti od kraja vlakna. Na primer, FTTC omogućava korisnicima asimetričan i simetričan pristup širokopojasnoj mreži, kao i usluge klasične telefonske službe POTS (*Plain Old Telephone System*) i usluge ISDN (*Integrated Services Digital Network*), dok FTTB pruža iste usluge za višestambene zgrade, kao i privatne linije za poslovne subjekte. FTTH omogućava asimetričan i simetričan pristup širokopojasnoj mreži, uz POTS i ISDN usluge za direktno povezane kuće [14].

### C. XG-PON

XG-PON (*10-Gigabit PON*) definisan je serijom standarda ITU-T G.987.1, može koegzistirati sa GPON standardom i omogućava protok od 10 Gbit/s

nizvodno i 2,5 Gbit/s uzvodno. XG-PON koristi WDM tehnologiju koja omogućava višestruko korišćenje optičkog vlakna za prenos podataka. Prednosti XG-PON mreže uključuju visoku brzinu prenosa podataka, podršku za veliki broj korisnika, veću propusnost za zahtevne aplikacije i poboljšane performanse u mreži. On takođe omogućava koegzistenciju sa prethodnim PON standardima. XG-PON je podeljen u dve klase. Prva klasa nazvana XG-PON1 omogućava asimetričnu transmisiju sa 10 Gbit/s nizvodno i 2,5 Gbit/s uzvodno. Druga klasa je XG-PON2 koja omogućava simetričnu transmisiju sa 10 Gbit/s. Druga klasa XG-PON2 se izdvojila kao samostalan standard XGS-PON [7].

Koegzistencija XG-GPON1 sa postojećim GPON je važan kriterijum prilikom razmatranja nadogradnje. Iako ovaj pristup smanjuje ukupne troškove, postoji dodatni trošak povezan sa filtriranjem talasnih dužina koje su potrebne kod ONU jedinice. U CO instaliran je novi uređaj pod nazivom WDMr1. Njegova funkcija je multipleksiranje i demultipleksiranje signala oba OLT uređaja i RF signala. Na korisničkoj strani, neophodno je koristiti WBF (*Wavelength Blocking Filter*) kako bi se omogućila diferencijacija PON saobraćaja podataka [15,16].

#### D. XGS-PON

FSAN je od 2013. godine radio na novom standardu XGS-PON (*10-Gigabit-Capable Symmetric Passive Optical Network*) koji je prvobitno bio nazvan XG-PON2 u već do sada objavljenom XG-PON standardu. Ovaj novi standard objavljen je 2016. godine a baziran na ITU preporuci: G.9807.1 – XGS-PON. XGS-PON je standard sa većim propusnim opsegom i simetričnim brzinama prenosa. Ovaj sistem operiše sa nominalnom brzinom prenosa od 10 Gbit/s u oba smera, kako nizvodno (od centralnog uređaja prema korisnicima) tako i uzvodno (od korisnika prema centralnom uređaju). Posедуje iste mogućnosti kao GPON i može koegzistirati na istom vlaknu sa GPON mrežom [7].

XGS-PON koristi TC (*Transmission Convergence*) framing podnivo za implementaciju DBA (*Dynamic Bandwidth Allocation*). OLT mora podržavati dve brzine (2,5 Gb/s i 10 Gb/s) kako bi omogućio koegzistenciju sa prethodnim standardima. Očekivanje da prelazak sa GPON na XGS-PON ne bi trebalo izazvati veće probleme.

#### E. NG-PON2

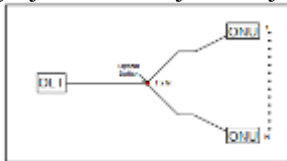
NG-PON2 ima sposobnost agregacije nizvodnog saobraćaja za rezidencijalne i poslovne primene i druge usluge. Ovaj standard je dizajniran da bude kompatibilan i koegzistira sa svim prethodnim standardima. Pored toga, NG-PON2 se može posmatrati kao uređena unapređena verzija XG-PON, sa velikom količinom ponovne upotrebe komponenti. NG-PON2 dobro koegzistira sa GPON, XG-PON i XGS-PON standardom. Godine 2015, ITU (G.989) je standardizovao novi standard NG-PON2 (40Gigabit-capable Passive Optical Network) [14].

Ovaj standard je dizajniran da bude kompatibilan i da koezistira sa svim prethodnim standardima. NG-PON2 se može smatrati realnim proširenjem verzije XG-PON, sa velikom količinom ponovne upotrebe komponenata. Sloj za konvergenciju prenosa (TC) je protokolni sloj NG-PON2, uključujući dinamičku alokaciju propusnosti (DBA) prisutnu i u prethodnim ITU standardima. NG-PON2 pruža pružaocima usluga značajne prednosti u odnosu na druge 10G PON tehnologije.

## V.KONTROLNI PRISTUPNI SISTEM (ACS)

U sada već zastupljenim PON mrežama neophodno je da se hiljade optičkih vlakana integrišu u CO radi pružanja širokopojsasnih usluga. Optička vlakna omogućavaju isporuku integrisanih glasovnih, podatkovnih i video usluga, koje zahtevaju visoku propusnost na udaljenostima većim od 20 km u okviru pretplatničke mreže. Svi prenosi u PON mrežama odvijaju se između OLT i ONT/ONU uređaja. OLT povezuje pristupnu mrežu sa metro kičmom, dok je ONU jedinica smeštena na lokaciji krajnjeg korisnika..

Duga napojna linija u PON mreži čini osetljiv deo mreže. U slučaju kvara, ako nije zaštićena cela PON mreža može biti isključena. Standardni model zaštite opisan je u ITU-T Preporuci G.983.1, prikazan je na slici 10, gde se koristi rezervno vlakno koje omogućava preusmeravanje saobraćaja putem optičkih prekidača. Većina sistema za praćenje koristi tradicionalni pristupi korišćenju OTDR za fizičku detekciju grešaka i precizno lociranje istih što dalje zahteva manuelno upravljanje i intervenciju stručnjaka [17].



Slika 70 Šema zaštite prema ITU-T preporuci [17]

Detekcija kvarova pomoću OTDR uređaja nije uvek efikasna, jer se raspršeno Rayleighovo svetlo iz različitih grana ne može jasno diferencirati na OTDR uređaju [18,19]. U tom smislu, ACS (*Access Control System*) se nameće kao rešenje koje može poboljšati procese nadgledanja i upravljanja u ovim mrežama. ACS predstavlja sistem za kontrolu pristupa koji omogućava upravljanje pristupom različitim uređajima, resursima i informacijama unutar mrežnih i bezbednosnih sistema. ACS sistemi su dizajnirani da obezbede siguran i efikasan način za autentifikaciju i autorizaciju korisnika, kako bi se pristup resursima odobrio samo ovlašćenim licima [17].

### A. Uloga ACS sistema

ACS-a je poboljšanje praćenja performansi mreže kroz integraciju različitih

informacija u realnom vremenu. Ovaj sistem omogućava operatorima da prate različite parametre kao što su propusnost, latencija, gubici signala i kvaliteta usluge iz jedne tačke, što doprinosi brzom otkrivanju i rešavanju problema. ACS može automatski prikupljati podatke sa OTDR uređaja, kao i drugih senzora i monitora, čime se olakšava proces dijagnostike. Na primer, ako OTDR otkrije gubitak signala, ACS može automatski poslati obaveštenje operateru ili čak inicirati rutinski pregled mreže [20].

Polazna tačka za integraciju ACS sistema sa PON mrežama je njegova automatizacija. To uključuje sve od konfiguracije uređaja do rutinskog održavanja i testiranja. Jedan od najvažnijih aspekata je automatizacija procesa merenja i dijagnostike putem OTDR uređaja. ACS omogućava operaterima da unapred definišu raspored za automatsko testiranje mrežnih segmenata, što značajno smanjuje potrebu za manuelnim intervencijama na terenu [21].

Jedna od osnovnih funkcija ACS sistema je centralizovano upravljanje mrežnim uređajima, uključujući optičke linije i krajnje tačke. U PON mrežama, gde se jedan optički signal deli između više korisnika, potreba za centralizovanim nadgledanjem i kontrolom je neophodna zbog složenosti arhitekture. Korišćenjem ACS sistema, operateri mogu pratiti performanse mreže iz jednog centralnog sistema [22].

ACS sistem je dizajniran da se lako integriše sa postojećim PON infrastrukturom, omogućavajući operaterima da unaprede svoje mreže bez potrebe za velikim promenama u postojećoj arhitekturi. ACS podržava širok spektar uređaja i tehnologija, što omogućava njegovu primenu u različitim tipovima PON mreža, uključujući GPON, EPON i XG-PON [23].

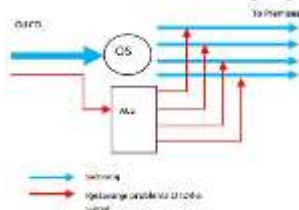
Jedna od najvrednijih funkcionalnosti ACS sistema je sposobnost praćenja performansi i analize podataka u realnom vremenu. ACS prikuplja i analizira podatke o performansama mreže, kao što su protoci podataka, greške, gubici paketa i drugi ključni indikatori. Ovi podaci se koriste za identifikaciju anomalija, optimizaciju mrežnih operacija i rešavanje potencijalnih problema pre nego što oni postanu kritični [24].

Korišćenje ACS sistema značajno doprinosi optimizaciji operativnih troškova u PON mrežama. Automatizacijom rutinskih zadataka, kao što su merenja, dijagnostika i konfiguracija uređaja, ACS smanjuje potrebu za tehničkim osobljem na terenu. Daljinsko upravljanje uređajima, kao što su OTDR i ONU jedinice, omogućava operaterima da reše većinu problema bez fizičkog prisustva na lokaciji. Ova smanjenja operativnih troškova dolaze zajedno sa poboljšanom efikasnošću, bržim otkrivanjem kvarova i povećanom pouzdanošću usluga. Na duži rok, investicija u ACS može doneti značajne finansijske uštede za operatere.

#### B. Kontrola praćenja ACS sistema

ACS može biti integrisan sa OTDR uređajem koji je već prisutan u mreži. ACS sistem omogućio je daljinsko upravljanje OTDR uređajem, automatsko

prikupljanje podataka o mrežnim performansama, i automatsku analizu tih podataka kako bi se prepoznali potencijalni kvarovi. ACS nadgleda status svakog OTDR uređaja povezanog na sistem i prenosi te informacije do mikrokontrolera. Nakon toga, informacije se organizuju u pakete i šalju putem LAN mreže koristeći ugrađeni Ethernet sistem. [25].



Slika 11 Mehanizam rutiranja putanje implementiran korištenjem ACS-a i OTDR-a [21]

ACS u realnom vremenu analizira performanse optičkih veza i automatski šalje upozorenja operaterima ukoliko bi došlo do degradacije signala. Integracija ACS prikazana je na slici 11 koja pokazuje da se ACS koristi za preusmeravanje OTDR test signala. Na primer, kada je jedan segment optičke mreže pokazivao povećani gubitak signala, ACS je automatski pokrenuo OTDR merenje i identifikovao tačnu lokaciju potencijalnog problema, bez potrebe za intervencijom tehničara na terenu.

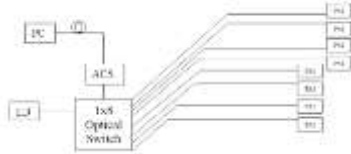
Tokom testiranja mreže, eksterno je instaliran selektivni spreznik za talasne dužine. Optički prekidač se koristi za praćenje i merenje mreže a omogućen je selektivni prekidač koji prebacuje signale u optičkim vlaknima ili integrisanim optičkim krugovima između različitih kola. Prekidač takođe omogućava alternativno rutiranje optičkih signala u slučaju kvara, kao što je preusmeravanje oko oštećenog dela mreže [21].

U slučaju kvara u sekciji napajanja, ACS šalje signal za aktivaciju zaštitne šeme. Ako se kvar otkrije u pristupnoj liniji, ACS prepoznaje odgovarajuću liniju na osnovu signala od 3%, koji je povezan sa svakom pristupnom linijom. Aktivacijski signal se šalje za pokretanje zaštitne šeme. U slučaju da se kvar ne otkloni, aktivira se rezervna zaštitna šema. Sekcija za praćenje signala odgovorna je za otkrivanje kvara i određivanje njegove tačne lokacije [22].

### C. Primena ACS na kontrolu splitera

Svaka ONU jedinica povezana je sa izlaznim terminalom optičkog splitera pomoću dva vlakna: radne putanje i zaštitne putanje, a prebacivanje između njih se obavlja putem optičkog prekidača kojim upravlja ACS sistem. ACS se koristi za praćenje statusa obe putanje. ACS prepoznaje tipove kvarova i šalje aktivacijski signal odgovarajućem optičkom prekidaču u skladu sa aktiviranim zaštitnim mehanizmima. Kako bi se kvar locirao bez prekida usluga ostalim korisnicima, koristi se talasna dužina različita od onih koje se koriste za

standardne usluge (1310 nm, 1490 nm i 1550 nm). Za detekciju kvarova, ACS integrisani sistem koristi testni signal na 1625 nm [26].



Slika 12 Blok dijagram eksperimentalnog sklopa ACS daljinskog upravljanja [20]

Testni signal na 1625 nm se multipleksuje sa standardnim signalima, i šalje putem OTDR-a koji je smešten u CO, a povezan sa udaljenim računarom radi prikaza rezultata analize. Kada se distribuiraju četiri različite talasne dužine, testni signal se odvaja pomoću selektivnog spreznika za talasne dužine WSC (*Wavelength Selective Controller*) postavljenog ispred optičkog razdelnika [27,28]. WSC spreznik omogućava prolaz samo testnom signalu na 1625 nm, dok eliminiše neželjene signale (1310 nm, 1490 nm i 1550 nm) koji bi mogli uticati na merenja OTDR uređaja. Nizvodni signal prolazi kroz WSC spreznik do razdelnika, a zatim do ONU jedinice. Testni signal na 1625 nm se, nakon demultipleksovanja pomoću WSC spreznika, dalje konfigurise putem optičkog prekidača, pri čemu je svaki izlaz prekidača povezan sa određenom linijom do ONU jedinice. Dijagram postavke prikazan je na slici 12 [29].

#### D. SANTAND pametno testiranje PON mreže

SANTAD (*Smart Access Network Testing, Analyzing, and Database*) koncept je inovativan pristup za upravljanje optičkim pristupnim mrežama, posebno dizajniran za PON mreže. Ovaj sistem kombinuje automatizovane tehnike testiranja, analizu velikih podataka (*Big Data*), i pametno upravljanje bazama podataka kako bi se unapredila pouzdanost, efikasnost i ukupne performanse mreža.

SANTAD je centralizovani sistem za kontrolu pristupa i nadzor koji unapređuje mrežne usluge omogućavajući prikaz protoka saobraćaja i detekciju bilo kakvog kvara, kao i drugih okolnosti koje zahtevaju preduzimanje odgovarajućih akcija putem grafičkog korisničkog interfejsa (*GUI*) izrađenog u *Visual Basic* okruženju, koji pruža intuitivan prikaz mrežnog saobraćaja, kvarova i drugih značajnih događaja. SANTAD omogućava operaterima da u realnom vremenu prate performanse mreže, analiziraju podatke i donose odluke bazirane na preciznim informacijama. SANTAD funkcioniše kroz tri osnovna koraka, koji zajedno pružaju potpunu kontrolu i nadzor nad optičkim mrežama.

Korišćenjem SANTAD sistema zajedno sa računarom ili laptopom opremljenim modemom ili LAN konekcijom, inženjeri i tehničari na terenu mogu lako komunicirati sa OTDR modulom za testiranje iz bilo kog dela sveta, bez potrebe za prisustvom osoblja na lokaciji. Na primer, inženjeri i tehničari u

postrojenju za vlakna mogu dobiti pomoć iz centralne kancelarije čime se smanjuje vreme reakcije i povećava efikasnost održavanja [17].

SANTAD prikuplja sve podatke sa OTDR uređaja na centralizovani računar, gde se vrši napredna analiza dobijenih merenja. Fokus ovog sistema je na očuvanju funkcionalnosti mreže identifikovanjem događaja koji uzrokuju gubitke i kvarove u optičkim vlaknima. U slučaju detekcije kvara, SANTAD generiše jasnu poruku o grešci, na primer: "linija x kvar na z km od CO". Na ovaj način mrežni operateri i inženjeri na terenu odmah dobijaju preciznu informaciju o lokaciji kvara, koja se identifikuje analizom drastičnog pada nivoa optičkog signala.

#### E. Prednosti i izazovi korišćenja ACS sistema u PON mrežama

ACS značajno smanjuje potrebu za manuelnim radom. Automatizovani pristup, koji obuhvata nadgledanje performansi i detekciju problema, dovodi do bržeg otkrivanja nepravilnosti u mreži [30]. ACS može proaktivno pratiti mrežu i odmah obavestiti operatere o mogućim problemima, čime se značajno smanjuje vreme potrebno za njihovo otklanjanje. Izbegavaju se dugotrajni prekidi u radu i povećava se ukupna stabilnost mreže [31].

Integracija ACS u postojeće PON mreže može biti skupa i zahtevati značajne investicije. Potrebna su ulaganja u novu opremu, softver, i često obuku osoblja koje će raditi sa ovim sistemima. Ovi troškovi mogu predstavljati prepreku, posebno za operatere sa ograničenim budžetom. Pored toga, sama tehnologija ACS može biti tehnički složena za implementaciju i upravljanje [32]. Za operatere koji nisu upoznati sa naprednim funkcionalnostima i mogućnostima ACS uvođenje ovakvog sistema može biti izazov. Potrebna je stručnost u radu sa ACS sistemom kako bi se pravilno konfigurisao i održavao, što zahteva visok nivo tehničkog znanja [33].

## VI. TESTIRANJE I REZULTATI PROJEKTOVANE GPON MREŽE

Upotreba, rad i održavanje PON mreža zahtevaju tehnike merenja za proveru ispravnosti funkcionisanja cele mreže, kao i njenih sastavnih komponenta. Glavni parametri koje instrumenti za testiranje treba da izmere u PON mreži su nivo optičke snage, gubitak snage dok svetlost prolazi kroz različite PON elemente i povratno slabljenje. U instrumente za testiranje optičke mreže spadaju OTDR (*Optical Time-Domain Reflectometer*) (koristi metodu refleksije), optički test set (predajnik i prijemnik određenih talasnih dužina- 1310, 1490 i 1550 nm), vizuelni indikator greške i specijalni test setovi za merenje optičkih gubitaka [9]. Osnovni merni instrumenti i instrumenti za testiranje PON mreže uključuju merače optičke snage, izvore svetlosti koju emituju na tri specifične talasne dužine (1310, 1490 i 1550 nm), vizuelne indikatore grešaka, optičke reflektometre u vremenskom domenu i specijalne

testove za povratno slabljenje. Ovi instrumenti pružaju razne statističke rezultate koji se dobijaju pritiskom na dugme, nakon što korisnik upiše parametre koji se testiraju i željeni opseg merenja [13].

#### A. OTDR

OTDR uređaj je višenamenski instrument koji se široko koristi za proveru karakteristika instalirane optičke mreže. Pored identifikovanja i lociranja grešaka ili anomalija u okviru linka, ovaj instrument meri parametre kao što su slabljenje vlakana, dužina, gubitak usled splajsovanja, gubitak na konektorim, nivo refleksije svetlosti.

OTDR je u osnovi optički radar. Funkcioniše povremenim puštanjem uskih laserskih impulsa na jedan kraj vlakna. Osobine vlakna optičkog linka se zatim određuju analizom amplitude i vremenskih karakteristika talasnog oblika povratnog svetlosnog impulsa. Tipičan OTDR se sastoji od izvora svetlosti i prijemnika, modula za prikupljanje i obradu podataka, jedinice za čuvanje podataka, bilo u unutrašnjoj memoriji ili na eksternom disku, i na ekranu. Slika 13 prikazuje prenosivi OTDR uređaj.



Slika 13 Prenosivi OTDR za merenje na terenu [9]

Slika 6.1 prikazuje tipičnu krivu koja se vidi na ekranu OTDR uređaja. Kriva prikazuje slabljenje u dB, u funkciji dužine u metrima. Na ekranu svaki događaj na krivoj se može numerisati, a ispod krive u tabeli se može prikazati lista tih numerisanih događaja sa odgovarajućim mernim jedinicama [16].

#### B. Testiranje GPON mreže

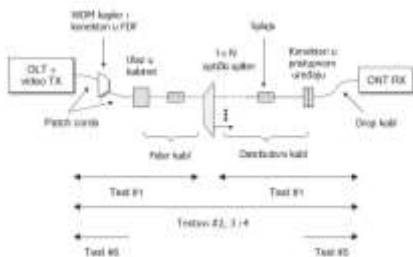
Brojni optički testovi se moraju izvršiti tokom primene PON mreže kako bi se utvrdilo da kablovska postrojenja i oprema za prenos na oba kraja zadovoljavaju specifikacije organizacije mreže. U ovom odeljku su opisane osnovne procedure merenja i instrumenti koji se mogu koristiti za ove testove. Na Slici 14 prikazana su opšta merenja između OLT uređaja u centrali i ONT uređaja u prostorijama korisnika.

Gubitak pojedinačnih vlakana u celoj mreži treba proveriti pre nego što se priključe na splitter. Ovo mora biti urađeno dvosmerno i da uključuje razvodni, distributivni i drop kabl između splitera i ONT jedinice. Nizvodna merenja treba izvršiti na 1490 i 1550nm talasne dužine, s obzirom da se slabljenje menja sa talasnom dužinom. Slično tome uzvodno merenje se vrši na 1310nm. Ova merenja se mogu vršiti na nekoliko načina u zavisnosti od dostupne opreme uz komunikaciju između osoblja za testiranje na oba kraja veze [14].

Osnovna svrha dvosmernih testova je da se provere moguće pojave kao što



su gubitci konektora i neusaglašenosti jezgra [28].



Slika 14 Opšta merenja između OLT-a u centrali i ONT-a u prostorijama korisnika [9]

### C. Analiza procesa projektovanja

Optička pristupna mreža je planirana sa jednim optičkim kablovskim područjem, sa dva ili jednim stepenom deljenja u delu distribucije i razvoda. Planirano je dovođenje jednog vlakna do svakog korisnika (stana, objekta) u delu razvodne mreže. Kapaciteti glavnog i distributivnih kablova su određeni na osnovu ukupnog broja potrebnih vlakana za GPON mrežu, sa rezervom od 50%, pri čemu je u određenim slučajevima vođeno računa da se izabere kabl čija konstrukcija omogućava smanjenje broja nastavaka na vlaknima.

Dizajn distribucije mrežnih kablova za FTTH mrežu zasniva se na korišćenju tri glavne kategorije optičkih kablova: primarni, distributivni i razvodni. Ovaj pristup omogućava efikasnu i pouzdanu distribuciju optičkih vlakana od centralne lokacije do krajnjih korisnika, obezbeđujući visokokvalitetnu širokopoljansku vezu. Predviđanje rezervnih vlakana i postavljanje spojnic na strateškim mestima omogućava fleksibilnost i skalabilnost mreže, što je važno za buduće proširenje i održavanje mreže.

Za povezivanje svih delova mreže odabrani su optički kablovi sa monomodnim vlaknima (prema preporuci ITU-T G.652D) predviđenim za rad na talasnim dužinama 1310, 1490 i 1550 nm.

### D. Testiranje implementirane mreže

Pri planiranju FTTH mreže neophodno je voditi računa o osnovnim polaznim elementima same mreže. Jedan kabl PON mreže može povezivati nekoliko spojnic. Maksimalna udaljenost spojnic od CO svakako zavisi od raspoloživog budžeta slabljenja, odnosno ukupnog slabljenja, na šta najviše utiče konfiguracija same mreže [3].

Po završenom spajanju kablova na celoj deonici vrši se kontrola kvaliteta izgrađene deonice. Meri se slabljenje svih spojeva na 1310 i 1550 nm u oba smera. Vrednosti merenja se unose u posebnu tabelu. Merenje vrednosti slabljenja za svaku dužinu kablova između spojeva vrši se u jednom smeru i rezultati se unose u posebnu tabelu.

U nastavku su predstavljeni rezultati testiranja primarnog segmenata mreže pomoću OTDR FTB-700 uređaja. Slike 15. i 16. prikazuju OTDR merenja za vlakno u kابلu sa 96 vlakana u jednomodnom režimu. Testiranja su obavljena na talasnim dužinama od 1310 nm i 1550 nm. Kابل ima dužinu od 3,87 km sa indeksom prelamanja od 1,46, a širina impulsa je podešena na 50 ns.



Slika 15 Rezultati OTDR testa za jednomodno optičko vlakno koristeći 1310nm



Slika 16 Rezultati OTDR testa za jednomodno optičko vlakno koristeći 1550nm

Rezultati OTDR merenja su prikazali ukupnu dužinu kabla, ukupno slabljenje i slabljenje po kilometru. Kao što je prikazano, dobijeni rezultati potvrđuju da su specifikacije i standardi zadovoljeni za obe talasne dužine, 1310 nm i 1550 nm. Rezultati su pokazali ukupno slabljenje od 0,96 dB za talasnu dužinu od 1550 nm, što odgovara prigušenju od 0,25 dB po kilometru. Za talasnu dužinu od 1310 nm, ukupno prigušenje iznosi od 1,53 dB, sa prigušenjem od 0,39 dB po kilometru. Ovi rezultati su u skladu sa prihvatljivim opsegom prema ITU standardima, koji specificiraju maksimalno dozvoljeno prigušenje od 0,4 dB/km za 1310 nm i 0,25 dB/km za 1550 nm.

#### E. Unapređenje opisanog projekta uz integraciju ACS sistema

ACS sistem bi mogao automatski detektovati potencijalne kvarove na PON mreži i preduzimati mere za preusmeravanje saobraćaja bez potrebe za ljudskom intervencijom. Na primer, ukoliko dođe do prekida na radnom vodu ACS bi mogao trenutno aktivirati zaštitnu liniju koristeći optičke prekidače čime se obezbeđuje kontinuitet usluga korisnicima [21].

Uvođenje ACS sistema u PON mreže omogućilo bi dalja unapređenja na više nivoa: od povećane pouzdanosti i sigurnosti do optimizacije resursa i brzine reakcije na kvarove. Konceptualno, ACS sistem nudi okvir za izgradnju

"pametnijih" mreža koje su u stanju da samostalno upravljaju, detektuju kvarove i optimizuju performanse u realnom vremenu. Integracijom ACS Sistema PON mreže bi postale znatno fleksibilnije i otpornije.

## VI.ZAKLJUČAK

Implementacija PON mreža predstavlja ključan korak u modernizaciji telekomunikacione infrastrukture, omogućavajući brži i stabilniji pristup internetu. Kroz korišćenje optičkih vlakana, PON mreže pružaju superiorne performanse u poređenju sa tradicionalnim tehnologijama, uz veću pouzdanost i podršku savremenim aplikacijama. Ovaj rad obuhvata sveobuhvatan pregled PON tehnologija, od tehničkih standarda i arhitekture do praktične implementacije i testiranja. Posebno je istaknut značaj ACS sistema za unapređenje praćenja i održavanja mreža, što doprinosi njihovoj efikasnosti i smanjenju troškova održavanja. Budući razvoj PON mreža će biti obeležen automatizacijom, integracijom sa inteligentnim sistemima poput ACS sistema kao i primenom veštačke inteligencije (AI) i mašinskog učenja (ML), što će učiniti mreže fleksibilnijima i otpornijima za rastuće zahteve digitalnog doba.

## VI.LITERATURA

- [1] J. A. S. S. H. a. J. A. L. V. Altabas, "Passive optical networks: Introduction," in Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering, John Wiley & Sons, 2018, pp. 1-20.
- [2] E. E.-O. E. Inc, "Testing Passive Optical Networks," FTTH PON Guide, vol. Canada, no. 5th edition, 2012.
- [3] C.a. M. K. Kherici, "Performance study of a coexistence system in a PON network taking into account the stimulated scattering of Raman," in E3S Web of Conferences 351, 2022.
- [4] L. Xue, Key Signal Processing Technologies for High-speed Passive Optical Networks, Göteborg, Sweden: Chalmers Tekniska Hogskola, 2021.
- [5] S. a. P. R. Lallukka, Passive optical networks: transport concepts, VTT Technical Research Centre of Finland, 2006.
- [6] C. F. Lam, Passive Optical Networks Principles and practice, San Diego: Academic Press, 2007.
- [7] International Telecommunication Union, "Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): General Characteristics," ITU-T G.984 Series, 2022.
- [8] A. R. T. a. H. S. Hammadi, "A case study on the architecture, design, implementation and testing of Fiber to the home (FTTH) green network in Kuwait," International Journal of Current Engineering and Technology, pp. 1622-1631, 2017.
- [9] G. Keiser, FTTH concepts and applications, John Wiley & Sons, 2006.
- [10] D. Dapas, UVOĐENJE TEHNOLOG GIGABITNE OPTIČKE PASIVNE MREŽE (GPON), Pula: Istrian University of applied sciences, 2019.
- [11] G. F. M. d. Lima, Decoding passive optical network surveillance based upon constraint management techniques, Uberlândia, 2014.
- [12] ITU-T Recommendation G.984.4 (GPON): "ONT management and control interface specification," International Telecommunication Union, 2014.
- [13] M. M. Rad, "Passive optical network monitoring: challenges and requirements," IEEE Communications Magazine, pp. 45-52, 2011.
- [14] T. F. G. a. V. M. P. Muciaccia, "Passive optical access networks: state of the art and future

- evolution," *Photonics*, vol. 1, pp. 323-346, 2014.
- [15] Z. Y. D. a. A. Abdellaoui, Design, implementation and evaluation of a Fiber To The Home (FTTH) access network based on a Giga Passive Optical Network GPON, University of Tunis El-Manar, National Engineering School of Tunis - ENIT, Communication Systems Research Laboratory SYSCOM, 2021.
- [16] N. Z. M. R. S. K. K. A. I. Auwalu Usman, "Optical link monitoring in fibre-to-the-x passive optical network (FTTx PON): A comprehensive survey," *Optical Switching and Networking*, 2020.
- [17] M. S. Ab Rahman, A. M. Moubark, M. N. Muhamad, S. S. Mokri, "Advancement of Monitoring Scheme in FTTH-PON Using Access Control System (ACS)," *Universiti Kebangsaan Malaysia*, Article, Jan. 2009.
- [18] Qi Shao, Ying Li, Yu Shao, Si-Ya Xu, "High-reliable WDM optical access network expanding by double fiber-tangent-ring topology," 2017 19th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS), 10.1109/APNOMS.2017.8094124, (263-266), (2017).
- [19] V.D. Lima, A. Klautau, J. Costa, K. Ericson, A. Fertner, C. Sales, "A wavelet-based expert system for digital subscriber line topology identification," *International Journal of Communication Systems*, 10.1002/dac.2795, 29, 1, (47-63), (2014).
- [20] Qi Shao, Chaoqin Gan, Ruixue Wang, "Extensible optical access network enabling multistage protections and data aggregation based on tangent rings," *International Journal of Communication Systems*, 10.1002/dac.2504, 27, 11, (2775-2784), (2013).
- [21] B.C. Ng, M.S. Ab-Rahman, A. Premadi, "Installation and Field Testing of Video Delivery System," *Asian Journal of Applied Sciences*, 10.3923/ajaps.2011.423.430, 4, 4, (423-430), (2011).
- [22] Zulhedry Abd Manaf, Mohd Syuhaimi Ab. Rahman, Mastang Tanra, Zulhedry Abd Manaf, "Development of protection and restoration module in PON distribution section," 2011 IEEE Student Conference on Research and Development, 10.1109/SCORED.2011.6148711, (73-78), (2011).
- [23] J. Smith, "How to Use an OTDR to Test Fiber Optic Networks," *FS.COM*, 2021.
- [24] P. Kumar, M. Johnson, "Access Control Systems for Network Optimization in FTTH Environments," *Cisco Systems*, 2020.
- [25] W. Li, Y. Zhang, "Intelligent Network Management with ACS: A Case Study," *Huawei*, 2019.
- [26] A. Jones, L. Patel, "Automation in Fiber Testing: The Role of ACS in Modern Network Management," *EXFO*, 2023.
- [27] R. Bianchi, L. Rossi, "Enhancing FTTH Networks with ACS Integration: Lessons Learned," *Telecom Italia Group*, 2020.
- [28] T. Nguyen, M. El-Sayed, "Remote Monitoring and Fault Detection in PON Networks Using ACS and OTDR Integration," *Journal of Optical Communications and Networking*, 2021.
- [29] M. Wang, Y. Liu, "Advanced Fiber Monitoring Techniques in FTTH Networks Using ACS Integration," *Optical Fiber Technology*, vol. 45, pp. 120-130, 2022.
- [30] A. Lee, R. Thomas, "Automated OTDR Testing in PON Networks: Benefits and Limitations," *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 7, pp. 85-91, 2021.
- [31] N. Kamiyama, S. Tanaka, Y. Tsukamoto, "Access control systems for efficient management in telecommunication networks," *Journal of Optical Communications and Networking*, 9(4), 345-358, 2017.
- [32] H. Takahashi, M. Nakamura, "Integration of OTDR with ACS systems for advanced PON monitoring," *IEEE Communications Magazine*, 58(6), 28-34, 2020.
- [33] J. Park, D. Lee, "Automation in fiber optic networks: Role of ACS," *Journal of Telecommunications Management*, 12(2), 102-119, 2019.

#### ABSTRACT

In the past decade, we have witnessed the rapid development of the Internet as well

as corporate networks. The evolution of mobile Internet, global digitalization, cloud computing, and the Internet of Things has consistently increased the bandwidth requirements across all segments of computing systems, from access networks to core networks. Under these conditions, optical access networks have emerged as an optimal solution for the implementation and further development of the access segment due to their service transparency, economic efficiency, energy savings, and higher security compared to other access networks. The International Telecommunication Union (ITU), together with the Full-Service Access Network (FSAN) organization, has established the necessary development steps and standards for next-generation access networks to meet the increasing capacity demands. Passive optical networks (PON) utilize passive components with low energy requirements, eliminating the need for power in the optical fiber distribution network. PON is currently primarily deployed in optical access networks as a Fiber to the Home (FTTH) solution, enabling triple-play broadband services of voice, data, and video over a single optical fiber shared among multiple users in residential areas. Managing these networks requires adequate tools for efficient cost monitoring. This includes troubleshooting with the ability to remotely differentiate between equipment failures and fiber breaks, followed by network localization, which is critical for telecommunications operators. The use of Optical Time-Domain Reflectometer (OTDR) techniques is widespread in point-to-point optical network topologies.

The objective of this master's thesis is to provide a comprehensive overview of the state of passive optical networks, exploring both theoretical concepts and practical applications. On the one hand, this work presents a complete and systematic review of passive optical access networks, addressing current research topics as well as key operational issues related to the guidelines for designing and implementing passive optical network architectures. Additionally, testing equipment for passive optical networks is presented, with detailed analysis of optical power and its measurement using optical power meters. On the other hand, the thesis analyzes a case study of FTTH network implementation in Serbia, encompassing conceptual design, adopted technologies, protocols, acceptance testing procedures, and service commissioning. The study includes methodologies employed by designers to calculate power budgets and transmission efficiency concerning required distances, operating wavelengths, split ratios, and minimum transmission power requirements. A step-by-step testing procedure is outlined to verify compliance with ITU standards and equipment specifications from various manufacturers. The results of OTDR measurements are graphically presented and thoroughly analyzed to verify the network's compliance with relevant standards and specifications.

*Keywords* – Internet of Things, Access Networks, PtP, P2MP, AON, PON, Multiplexing, CO, OLT, ONT, ONU, GPON, XG-PON, XGS-PON, NG-PON2, FTTH, OTDR, ACS System, SANTAND

## **ANALYSIS AND TESTING OF NEXT-GENERATION PASSIVE OPTICAL ACCESS NETWORK**

**Đorđe Petrović, Mirjana Radivojević**

