

ENERGETSKA EFIKASNOST I POUZDANOST OPTIČKIH PRISTUPNIH MREŽA U KONTEKSTU ZELENE TRANZICIJE / ENERGY EFFICIENCY AND RELIABILITY OF OPTICAL ACCESS NETWORKS IN THE CONTEXT OF GREEN TRANSITION

Zijad Havić¹, Bekir Fulan¹

¹IUT, Fakultet politehničkih nauka Travnik, Aleja konzula – Meljanac bb, 72270 Travnik,
Bosna i Hercegovina,
e-mail: zijad.havic54@gmail.com, bekir.fulan@gmail.com

Izvorni naučni rad

<https://www.doi.org/10.58952/zr20251401038>

UDK / UDC 621.391:620.9:502.131.1

Sažetak

Širokopojasne pristupne telekomunikacijske mreže zahtijevaju detaljnu analizu potrošnje energije i implementaciju redundantnih struktura radi efikasnosti i ekonomičnosti. Povećanje cijena energije i potreba za pouzdanošću mreža naglašavaju važnost optimizacije potrošnje energije i smanjenja utjecaja na okolinu. Rješenje leži u oblikovanju mreža koje održavaju funkcionalnost uz nižu potrošnju energije i manju emisiju štetnih tvari. Ovaj rad analizira potrošnju energije i redundantnu strukturu FTTH i FTTB mreža, pri čemu FTTB koristi bakrenu paricu od aktivnog stupnja do pretplatnika. Pristupne mreže su najveći potrošači energije zbog brojnih aktivnih elemenata, posebno u elektroničkoj domeni. Ukupna potrošnja energije u mreži može se izraziti kao suma utrošaka u centrali (EECO), aktivnom stupnju (EEAS) i kod pretplatnika (EECP), pomnoženo s brojem pretplatnika $N(t)$. Redundantni uređaji osiguravaju kontinuitet rada preuzimanjem funkcija u slučaju kvara. Za smanjenje emisija i poboljšanje energetske efikasnosti ključno je istražiti primjenu zelenih tehnologija kao rješenje za pogon telekomunikacijskih uređaja. Održiv razvoj mreža zahtijeva balans između energetske efikasnosti, pouzdanosti i ekonomičnosti, uz primjenu novih tehnologija koje smanjuju ekološki otisak.

Ključne riječi: Optička pristupna mreža, fotonaponske ćelije, model troška, potrošnja energije
JEL Klasifikacija: L96, Q42, Q55 I D24

Abstract

Broadband access telecommunications networks require a detailed analysis of energy consumption and the implementation of redundant structures for efficiency and cost-effectiveness. Increasing energy prices and the need for network reliability highlight the importance of optimizing energy consumption and reducing environmental impact. The solution lies in designing networks that maintain functionality with lower energy consumption and lower emissions of harmful substances. This paper analyzes the energy consumption and redundant structure of FTTH and FTTB networks, where FTTB uses copper pairs from the active stage to the subscriber. Access networks are the largest consumers of energy due to the numerous active elements, especially in the electronic domain. The total energy consumption in the network can be expressed as the sum of the consumption in the exchange (EECO), the active stage (EEAS) and at the subscriber (EECP), multiplied by the number of subscribers $N(t)$. Redundant devices ensure continuity of operation by taking over functions in the event of a failure. To reduce emissions and improve energy efficiency, it is crucial to explore the application of green technologies as a solution for powering telecommunications devices. Sustainable network development requires a balance between energy efficiency, reliability and cost-effectiveness, with the application of new technologies that reduce the ecological footprint.

Keywords: Optical access network, photovoltaic cells, cost model, energy consumption
JEL classification: L96, Q42, Q55 I D24

UVOD

Zahtjevi pretplatnika za širokopojasnim telekomunikacionim uslugama (triple play) i pristup u telekomunikacionim mrežama igra ključnu ulogu u razvoju konkurentnosti i oblikovanja društva. Korisnici telekomunikacionih usluga postavljaju i zahtjev za pouzdanim radom uređaja. Cilj rada je da analizira tranziciju napajanja iz klasičnog način napajanja električnom energijom iz javne energetske mreže na napajanje primjenom fotonaponskih ćelija i planiranje mreža nove generacije s obzirom na novi način napajanja vodeći računa o ugradnji redundantnih struktura. Smjernice telekom operatera za buduće pristupne mreže Telekom operateri u svakodnevnim aktivnostima definiraju smjernice za implementaciju pristupnih mreža. U uslovima tranzicije na napajanje fotonaponskim ćelijama, postavlja se pitanje da li je moguće realizirati sve planirane odredbe:

1. Velika brzina- brzine moraju zadovoljiti buduće potrebe
2. Skalabilnost – proširivost različitim uređajima (serveri- senzori) uz dodjelu adresa
3. Otvorenost na konkurenciju
4. Stabilnost- mreža mora biti raspoloživa (medicinska njega, kontrola prometa,SOS)
5. Sigurnost-mora omogućiti siguran pristup (autentifikacija)
6. Jednostavnost – povećana pouzdanost
7. Smanjena potrošnja električne energije – brojni uređaji zahtjevaju veliku potrošnju el. energije
8. Isplativost – mreža mora troškovno zadovoljavati društvene mogućnosti

1. ANALIZA FTTH ARHITEKTURA S ASPEKTA TRANZICIJE NAPAJANJA

Razlikujemo tri vrste arhitekture FTTH mreža. Svaka zahtjeva potreban broj linijskih kartica u aktivnom stupnju u centrali sa potrebnim brojem portova kojima treba napajanje.

- Home run vlakno

Ova arhitektura podrazumijeva da se svaki korisnik je priključen jednim dodijeljenim vlaknom na centralu. U lokalnoj centrali, P2P sistem treba port za svakog korisnika dok port kod GPON sistema podržava 32 ili 64 korisnika. P2P portovi rade na 100 Mbit/s, a dok GPON portovi rade na 2,5 Gbit/s prema svim korisniku i 1,25 Gbit/s od korisnika. Odnos potrošnje energije GPON i P2P sistema ovisi o broju aktivnih korisnika.

- Arhitektura aktivne zvijezde

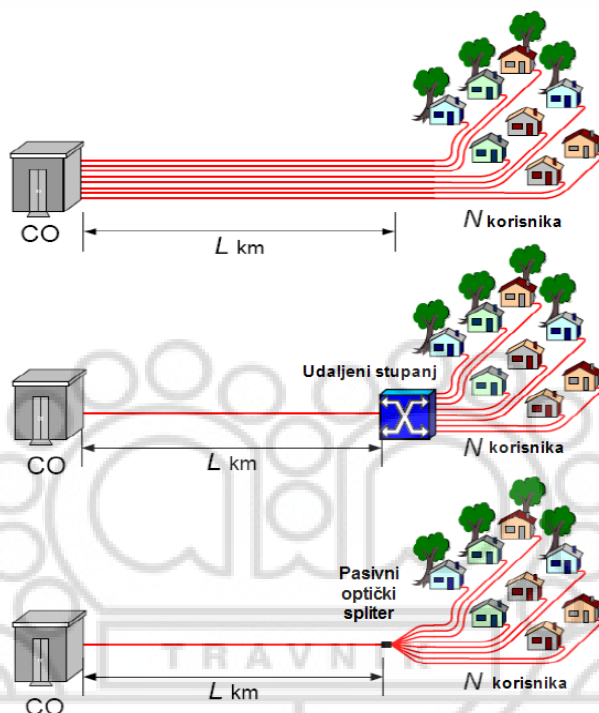
Arhitektura aktivne zvijezde (active star) koristi Ethernet linijske kartice i lokalno napajanje je korisnika koji je bio priključen na VDSL strukturu s bakrenim paricama sada se priključuje s optičkim vlaknima.

- PON (Passive Optical Network)

Pasivnu optičku mrežu (Passive Optical Network) karakterizira dijeljenje prijenosnog medija pasivnim djeliteljem u obliku razgranatog stabla. Pojedinačno GPON portovi troše više električne energije nego portovi kod P2P.

- FTTB/C

xDSL je dominantna širokopojasna pristupna tehnologija u Europi gdje 66% korisnika koriste xDSL za pristup Internetu. Prijenosni medij od aktivnog stepena je upređena bakrena parica. Važno je istaknuti da je razina potrošnje električne energije FTTB tehnologije viša od potrošnje energije pristupnih mreža temeljenih na FTTH tehnologiji.



Slika 1. Tri arhitekture FTTH mreže (home ran vlakno, aktivna zvijezda i pasivna optička mreža)

Općenito ulazni parametri za potrošnju električne energije su:

- broj linijskih i kontrolnih kartica u agregacijskom čvoru u centrali
- broj linijskih kartica u aktivnom stupnju
- broj CPE uređaja kod pretplatnika
- potrošnja svake linijske kartice i CPE uređaja (W)

Izlazni parametri potrošnje električne energije su:

- potrošnja električne energije linijskih i agregacijskih kartica (W)
- potrošnja CPE uređaja kod pretplatnika (W)
- ukupna potrošnja po pretplatniku (W)
- ukupna potrošnja električne energije pristupne mreže (W)

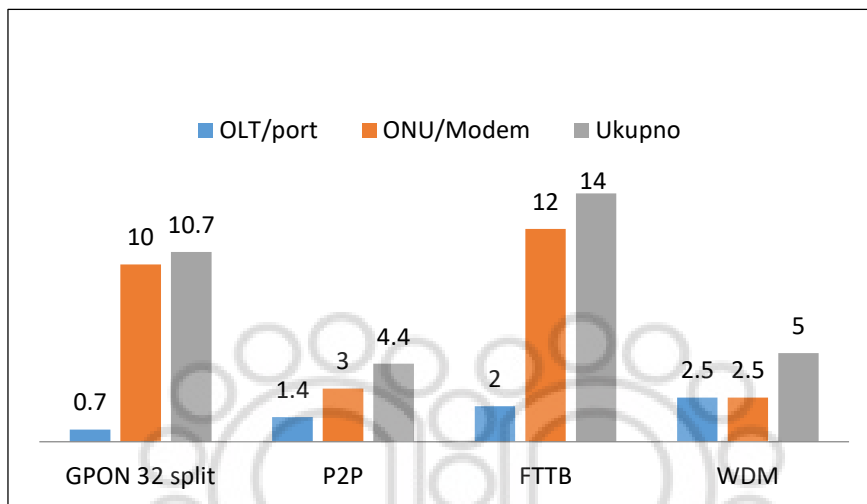
Ukupna potrošnja električne energije se dobije primjenom formule

$$EE_{UK} = N(t) \cdot (EE_{CO} + EE_{AS} + EE_{CP})$$

Gdje je suma utroška energije u centrali EE_{CO} , energije aktivnog stupnja EE_{AS} i potrošnje energije kod pretplatnika EE_{CP} , i sve pomnoženo s brojem pretplatnika $N(t)$.

2. POTROŠNJA ELEKTRIČNE ENERGIJE PRISTUPNIH MREŽA NOVE GENERACIJE

Efikasnost pristupne mreže može se definirati odnosom utroška energije i prenesene količine podataka. Kod optičkih pristupnih mreža, potrošnja energije opada po prenijetom bitu s porastom prosječne brzine prijenosa. Grafikon potrošnje energije za jednog pretplatnika, prema podacima proizvođača opreme [18] za različite pristupne mreže prikazan je na slici 2. Pri tome treba voditi računa i o povećanju potrošnje energije redundantnih elemenata u režimu tzv. Vruće rezerve kada obje strukture rade istovremeno. Kada je rezervna struktura u stanju mirovanja nema značajnije promjene u potrošnji. To je tzv. hladna rezerva i uključuje se samo kad je radna struktura u kvaru.



Slika 2. Potrošnja električne energije po korisniku za različite tehnologije (W) [18]

Ukupna potrošnja električne energije FTTB mreže je 14 W po pretplatniku od čega 12 W troši modemska jedinica a 2 W port na linijskoj kartici. Iz slike je vidljivo da P2P i WDM pristupne mreže imaju nižu razinu potrošnje u usporedbi s FTTB i GPON mrežama. Proizvod broja pretplatnika po godinama implementacije i potrošnje energije po pretplatniku za svaku tehnologiju dobije se predviđanja rasta potrošnje energije kroz period implementacije prikazanih tehnologija.

2.1. PODMODEL POTROŠNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE U OPTIČKIM MREŽAMA

Pristupna mreža čini veći dio telekomunikacijske mreže i glavni je potrošač električne energije, zbog prisustva velikog broja aktivnih elemenata. Postojeće analize pokazuju da pristupne mreže troše oko 70% ukupne potrošnje električne energije cjelokupne telekomunikacijske mreže. Svaki korisnik posjeduje vlastiti modem. U Tabeli 1. naveden je podatak o širini propusnog pojasa širokopojasne mreže, potrošnja električne energije po korisniku i efikasnost mreže kroz broj prenešenih bita po watu energije.

Tabela 1. Potrošnja električne energije arhitektura pristupnih mreža [18] i [20]

Potrošnja (W)	FTTB	PON (32 djelitelj)	P2P	WDM
OLT/ DSLAM (port)	2 W	0,7 W	1,4 W	2,5 W
Modem kod pretplatnika	12 W	10 W	3 W	2,5 W
Ukupno	14 W	10,7 W	4,4 W	5 W

Tabela 2. Propusni pojas, potrošnja po korisniku i potrošnja po prenijetom bitu optičkih mreža [19]

Parametri	FTTB	PON (32 djelitelj)	P2P	WDM
Mbit/s	50	77,8	100	>100
W/korisnik	14	10,7	4,4	5
Mbit/W	7,14	7,4	22	>20

$$E_{FTTH} = \frac{B(\text{Mbit/s})}{E(W)} = \frac{78}{10,7} = 7,29 \frac{(\text{Mbit/s})}{(W)}; E_{FTTC} = \frac{B}{E} = \frac{20}{14} = 1,42$$

gdje su:

E – potrošnja energije FTTC mreže po korisniku (W)

B - širina propusnog pojasa po korisniku

Vidljivo je da P2P mreže imaju širi propusni pojas, troše manje energije po korisniku a to ima za posljedicu da prenose veću količinu informacija po jedinici potrošene energije.

3. RASPOLOŽIVOST OPTIČKIH MREŽA I POTROŠNJA ENERGIJE

Pitanje raspoloživosti mreže pokazuje se značajnim jer bitno utječe na kvalitetu usluge na različitim razinama mreže. Da bi se postigla visoka ili tražena raspoloživost nameće se potreba efikasnijeg upravljanja kvarovima u telekomunikacijskoj mreži a time i u pristupnoj optičkoj mreži. Potrebne su dodatne investicije odnosno troškovi za zaštitu mreže od kvarova i povećanje njezine raspoloživosti. Raspoloživost pristupne mreže A je vjerojatnost da će mreža biti funkcionalna u danom vremenskom trenutku. Prikazan je način izračuna raspoloživosti pristupne mreže. Raspoloživost je izračunata na temelju raspoloživosti mrežnih komponenti i strukture. Za svaku se komponentu prikupljaju podaci o srednjem vremenu do kvara (MTTF- *Mean Time to Failure*) i srednjem vremenu otklanjanja kvara (MTTR- *Mean Time to Repair*). Funkcija raspoloživosti A teži prema stacionarnoj raspoloživosti A_s kada vrijeme t teži u beskonačnost.

$MTTF$ se može izraziti pomoću učestalosti kvarova λ , koja predstavlja broj kvarova u vremenskom intervalu. λ se izražava u jedinici FIT. 1 FIT odgovara 1 kvaru na 10^9 sati.

$MTTR$ se može izraziti pomoću intenziteta obnavljanja μ , i predstavlja broj popravaka u jedinici vremena. Vrijednost μ je recipročna vrijednost srednjeg vremena do popravka kvara; $\mu=1/MTTR$.

Pod pretpostavkom da je $A(t=0)=1$ možemo pisati da je raspoloživost:

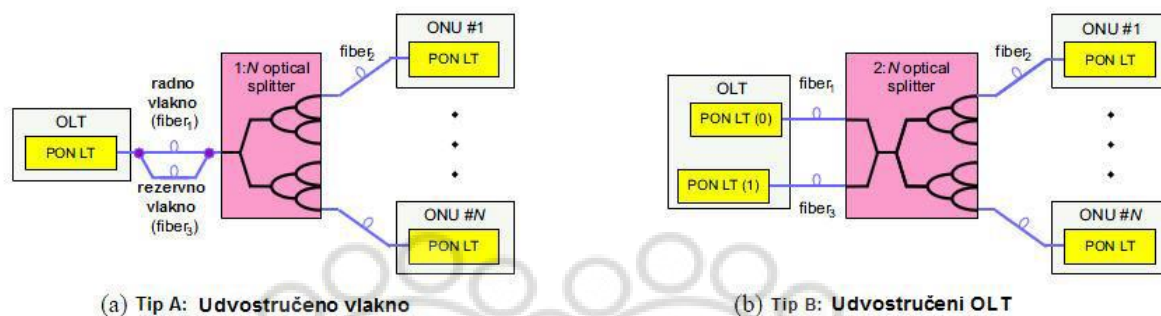
$$A = A_s = \lim_{t \rightarrow \infty} A(t)$$

Budući je $\lambda \ll \mu$, formula nerasploživosti može biti napisana kao

$$A = 1 - U$$

U pristupnoj mreži osnova za komunikaciju je prijenosni kanal N_{ch} . Kod WDM optičkih mreža kanal odgovara *valnom kanalu* tj. kanalu na pojedinačnoj valnoj duljini na bilo kojem vlaknu u mreži. Valni kanal je raspoloživ ako su odgovarajuće vlakno, OLT i ONU raspoloživi. Zaštite optičkih pristupnih mreža može se analizirati s više udvostručenih elemenata mreže koji ma je potrebno napajanje ali povećana potrošnja komponenata. Za zaštitne arhitekture PON mreže razvijen je standard od strane ITU-T [14].

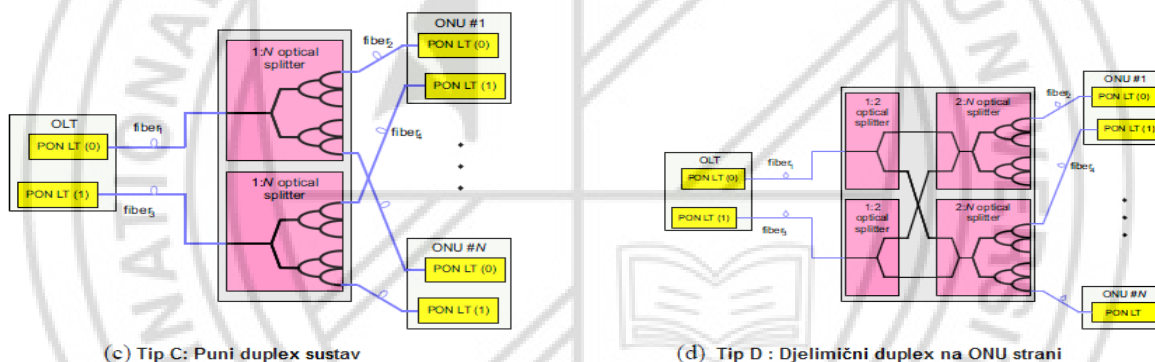
Ove zaštitne arhitekture PON mreže su nazvane tipovima A, B, C i D.



Slika 3. A i B tip zaštite prema ITU-T [14]

Kod Tipa A redundantno je vlakno od OLT-a do djelitelja (*feeder fiber* - FF). Tip B zaštite udvostručuje dio PON-a koji se odnosi na vlakna od OLT-a do djelitelja i optički linijski terminal (OLT- *Optical Line Termination*). Tip C predstavlja 1+1 zaštitu puta s punim udvostručavanjem PON resursa. To znači da oba sistema (primarni i sekundarni) paralelno rade, što dozvoljava vrlo kratko vrijeme ponovne uspostave radnog režima nakon pojave kvara.

Tip D zaštite specificira udvostručavanje primarnog, sekundarnog i distributivnog vlakna te tako omogućava operatoru da ponudi diferenciranu razinu raspoloživosti.

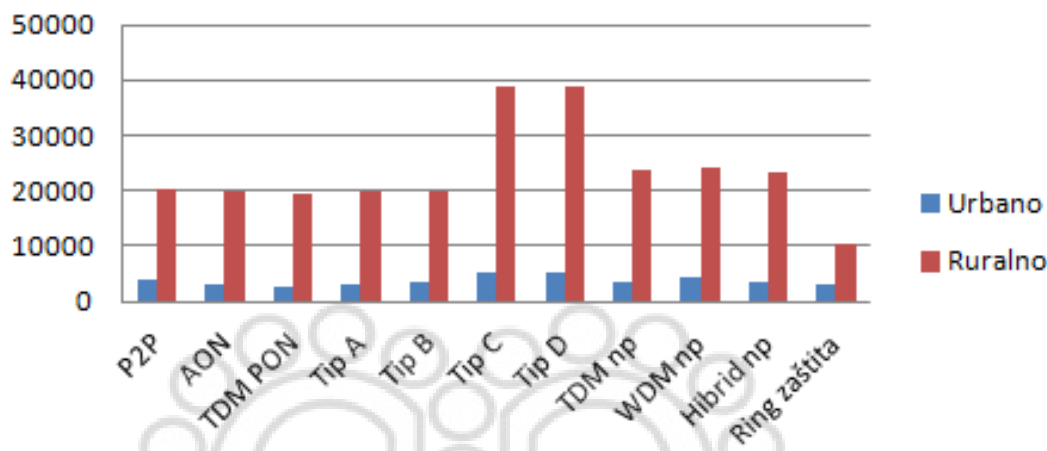


Slika 4. C i D tip zaštite prema ITU-T [14]

Poboljšanje raspoloživosti mreže dodavanjem redundantnih komponenti je skupo i stvara dodatne troškove pretplatniku ako se on odluči za varijantu pristupa s većom raspoloživošću.

4. TROŠAK REDUNDANTNE ARHITEKTURE

Redundantna struktura pristupne mreže podrazumijeva udvostručavanje komponenti mreže. Udvostručene komponente su rezerva u radu i preuzimaju promet u slučaju kvara. Shodno tome nabavka redundantne opreme znači i izdvajanje sredstava što doprinosi povećanju ukupnog troška implementacije. Redundantna struktura može biti i u instalacijskom dijelu. Ulazni parametri instalacijske redundancije su aktivnosti iskopa rova, polaganje cijevi, izgradnja okana za distribucijsku opremu, provlačenje kablova i popratna oprema vezana za ovu redundanciju. Slika 5 pokazuje trošak po korisniku koji se odnosi na različite arhitekture pristupne mreže bez zaštite i s različitim tipovima zaštite. Može se uočiti da su troškovi koji se odnose na komponente mnogo viši kod arhitektura koje su sa zaštitom. Također, troškovi izgradnje PON mreže, zasnovane na zaštiti susjednog korisničkog uređaja, slični su troškovima osnovne arhitekture (Tipu A mreže). Bitno smanjenje troškova može biti kod arhitekture zasnovane na zaštiti susjednog korisnika u usporedbi s arhitekturom Tipa C i Tipa D.



Slika 5. Trošak za urbano i ruralno područje ITU-T tipova mreža

Može se uočiti da hibridna PON mreža ima niže troškove po korisniku ako se usporedi s TDM i WDM PON. Trošak zbog prekida prometa je proporcionalan broju sati prekida. Može se zaključiti da je trošak zbog prekida prometa mnogo viši za Tip A arhitekturu jer u mreži nije izvedena zaštita. Općenito, postoje dva tipa strukture raspoloživosti: 1+1 struktura i 1:1 struktura. Struktura 1+1 predstavlja dvije preklapljene PON mreže. Promet se proslijeđuje u obje mreže; radnoj PON mreži i zaštitnoj PON mreži. Dolaskom signala na OLT, promet se selektira ovisno o kvaliteti signala. Na ovaj način omogućena je brza zaštita. Ova struktura ne može podržati dodatni promet. U usporedbi s arhitekturom bez zaštite, ova arhitektura zahtijeva dvostruki propusni pojas. U 1:1 strukturi, promet se prenosi kroz radnu PON mrežu. U slučaju kvara, promet se preusmjerava na zaštitnu PON mrežu. Ovaj pristup je relativno sporiji od 1+1 strukture. Raspoloživost pojedine tehnologije možemo izračunati na sljedeći način:

Raspoloživost za FTTB mrežu:



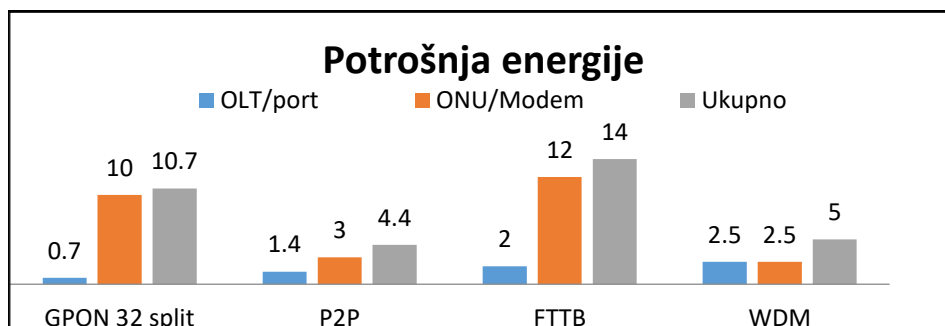
Slika 6. Raspoloživost osnovne arhitekture

Raspoloživost arhitekture na slici 6 može se napisati na sljedeći način:

$$A = A_{OLT} \cdot A_{vl1} \cdot A_{dj} \cdot A_{vl2} \cdot A_{ONU}$$

5. ANALIZA POTROŠNJE ENERGIJE U OPTIČKIM MREŽAMA

Sadašnja procjena pokazuje da pristupne mreže troše oko 70% od ukupne potrošnje energije telekomunikacijskih mreža. Smanjenje potrošnje energije u pristupnim mrežama značajno će smanjiti potrošnju energije u internetskoj mreži. Potrošnja električne energije pristupnih mreža direktno je zavisna o broju pretplanika a ne o području implementacije. Zato je analiza usmjerena na tehnologije i arhitekture mreža. Kao primjer može se navesti xDSL mreža koja koristi vlakno kao spojni put do centrale. Zbog toga će se razvojem energetski štedljivih pristupnih tehnologija zasnovanih na optičkom vlaknu u budućnosti koristiti energetski i štedljivije optoelektričke pristupne mreže. Potrošnja energije po korisniku pokazuje da su tehnologije P2P i WDM najefikasnije u kategoriji optičkih pristupnih mreža.



Slika 7. Potrošnja električne energije po komponentama u vatima

Povećanjem broja korisnika na splitteru, utrošak energije se raspoređuje na veći broj korisnika na portu što znatno smanjuje utrošak energije po korisniku i približava efikasnost PON mreže prema P2P mrežama. Da bi definirali mjeru efikasnosti pojedine mreže E_f obzirom na potrošnju električne energije potrebno je normalizirati potrošnju električne energije E s propusnim pojasom za pojedinu mrežu označenim s B . Ovo će dati normaliziranu potrošnju energije E (izraženu u W) a B označava efektivni propusni pojas (bit u sekundi)

$$E_f = \frac{B}{W} \left[\frac{\text{Mbit/s}}{\text{W}} \right]$$

U širokopojasnim mrežama sadašnje generacije E_f se izražava u Mbit/W, označavajući količinu energije (u džulima) potrebnu da se niz podataka (u bitima) prenese kroz mrežu.

Tabela 3. Odnos broja prenetih bita u odnosu na potrošenu energiju

$E_f = \frac{B}{W} \left[\frac{\text{Mbit/s}}{\text{W}} \right]$			
FTTB/C	PON 32 djelitelj	P2P	WDM
7,1 / 3,5	7,2	22,7	< 20

6. ANALIZA RASPOLOŽIVOSTI U PRISTUPNIM MREŽAMA

U ovom poglavlju su prezentirane vrijednosti raspoloživosti za tehnologije širokopojasne pristupne mreže koje su izračunate pomoću raspoloživosti mrežnih komponenti i analitičkog modela raspoloživosti pojedine tehnologije. Kao i potrošnja energije, raspoloživost ne ovisi od područja implementacije nego od raspoloživosti komponenti pojedine tehnologije.

Tabela 4. Raspoloživost pojedine tehnologije

Raspoloživost A(t)			
FTTB/C	PON	P2P	WDM
0,999888	0,999833077	0,999943	0,999833397

Slično ulaznim podacima za izračunavanje raspoloživosti za računanje ukupnog troška i troška po korisniku, kao i ostalih parametara isplativosti pristupnih mreža sljedeće generacije, korištene su formule proistekle iz arhitekture pojedinih mreža. Ulazni podaci korišteni u izračunavanju raspoloživosti navedeni su u [25] a podaci za izračunavanje troška implementacije korišteni su iz [1] i [3].

7. MOGUĆNOST NAPAJANJA OPTIČKIH MREŽA PRIMJENOM SOLARNIH PANELA

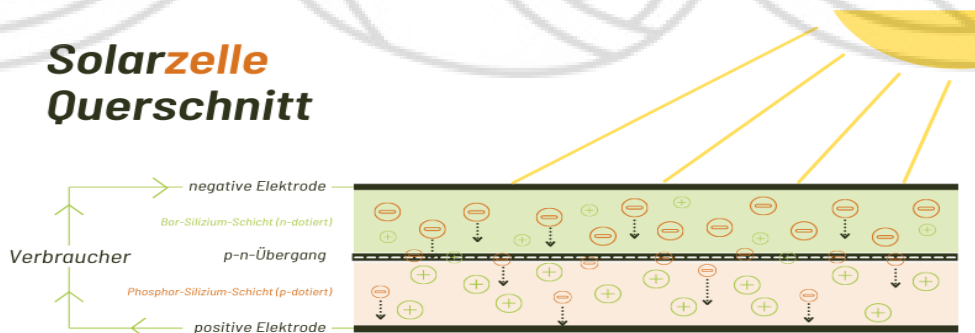
Solarni panel je kombinacija mnogih pojedinačnih solarnih ćelija. U njima se električna energija stvara zračenjem sunčeve svjetlosti. Spajanje nekoliko solarnih panela rezultira solarnim ili fotonaponskim sistemom. Ovisno o komponentama i veličini sistema, solarna energija može opskrbiti aktivni stepen (OLT) električnom energijom koju sami proizvedu. Solarni panel, poznat i kao solarni modul, fotonaponski modul ili solarni panel, odgovoran je za pretvaranje svjetlosti u električnu energiju. Otkriće solarne energije datira još od 1950-ih. Od 1980-ih, tehnologija je postala važnija za snabdijevanje električnom energijom brojnih uređaja. Zahvaljujući intenzivnom istraživanju i stalnom padu troškova, solarna energija je napravila još jedan veliki iskorak. Solarni panel se sastoji od 120 solarnih ćelija. Kombinacija nekoliko solarnih modula naziva se solarni sistem. Koliko je solarnih panela potrebno za solarni sistem zavisi od lokalnih uslova, na primjer, sunčani sati u regiji, potrošnja energije u mreži itd. Solarni panel se sastoji od različitih slojeva s različitim funkcijama. Gornji dio modula ima prednju staklenu ploču i plastični sloj ispod koji osiguravaju optimalnu zaštitu od vanjskih utjecaja kao što su temperatura, padavine ili vlaga.



Slika 8. Solarni panel

Gornji sloj solarnih ćelija formira plavi „sloj protiv refleksije”. Ovo sprečava refleksiju svjetlosti. Proizvodnja električne energije od sunčeve svjetlosti solarnog panela zasnovana je na takozvanom foto efektu. Proces je sljedeći:

Solarna ćelija se sastoji od negativnog i pozitivnog polarizovanog silicijumskog sloja. Jedan od dva sloja se uvijek sastoji od poluprovodničkog silicijuma i elementa s nedostatkom elektrona, najčešće bora. Drugi sloj ćelije sastoji se od silicija i elementa sa viškom elektrona, obično fosfora. Sloj bor-silicij je negativno nabijen, a sloj fosfor-silicijum je pozitivno nabijen. Dva sloja silicijuma su razdvojena slojem atoma bora koji su već preuzeli dodatni elektron. Ovaj sloj se naziva i p-n spoj. Višak elektrona u sloju bor-silicijum sada se aktivira upadom sunčeve svjetlosti visoke energije. Kako bi se uspostavila ravnoteža unutar ćelije, elektroni sada migriraju iz negativno nabijenog sloja bor-silicij preko p-n spoja u pozitivni sloj fosfor-silicij. Ova razmjena stvara stalan protok elektrona unutar ćelije. Da bi se ovaj tok elektrona pretvorio u kolo, u posljednjem koraku elektroni se vraćaju na negativnu elektrodu preko vanjskog, metalnog vodiča iz pozitivne elektrode - preko međupotrošača. Solarna energija teče.



Slika 9. Uticaj sunca na elektrone p i n tipa Solarnih panela

Budući da solarni panel pretvara sunčeve zrake u jednosmjernu struju, potrebno je za neke uređaje solarnu struju pretvoriti u naizmjeničnu struju uz pomoć pretvarača. Bitno je da performanse solarnog panela ne zavise od temperature već od intenziteta upadne svjetlosti. Peak opisuje maksimalne performanse solarnog sistema. Što je više svjetlosti ozračeno, solarni panel stvara veću energiju.

ZAKLJUČAK

U prvom dijelu rada provedena je analiza optičkih mreža sljedeće generacije i navedeni rezultati istraživanja pojedinih autora na području potrošnje električne energije pristupnih mreža. Tehnički modeli zasnovani su na dokumentu Europske komisije koja je predložila tehnologije pristupnih mreža sljedeće generacije. Uz pomoć matematičkog modela i predložene metode analize prikazan je analitički modeli i metode za predviđanje potrošnje električne energije pristupnih mreža. Metoda analize implementirana je u okviru programskog alata [19] koji predviđa i izračunava utrošak električne energije. Na temelju primijenjene metodologije može se potvrditi sljedeća hipoteza i činjenica Pristupne mreže sljedeće generacije s optičkim vlaknima od centrale do korisnika (FTTH) pokazuju manju potrošnju električne energije od mreže koje u sebi sadrže bakrene dionice. Uzimajući u obzir maksimalnu iskorištenost i visoku efikasnost, modernih solarnih modula da mogu postići snagu od 350 do 450 Wp i podataka iz Tabele 3. o maksimalnoj potrošnji energije na kraju izgradnje i priključenja 8000 pretplatnika može se izračunati broj potrebnih solarnih modula. Predložena metodologija tehno-ekonomske analize primjenjiva je također za analizu pristupnih mreža u drugim zemljama uz primjenu lokalnih parametara uz zaključak da solarni moduli mogu biti primijenjeni za napajanje aktivne opreme u pristupnim mrežama.

LITERATURA

- [1] B. Lannoo, L. Verslegers, D. Colle, M. Pickavet, M. Gagnaire, P. Demeester, "Analytical Model for the IPACT Dynamic Bandwidth Allocation Algorithm for EPONs", *Journal of Optical Networking*, ISSN 1536-5379, vol. 6, no. 6, pp. 677-688, Jun. 2007.
- [2] S. Verbrugge, K. Casier, B. Lannoo, J. Van Ooteghem, R. Meersman, D. Colle, P. Demeester, "FTTH deployment and its impact on network maintenance and repair costs", accepted for ICTON/RONEXT 2008
- [3] B. Lannoo, S. Verbrugge, J. Van Ooteghem, B. Quinart, M. Casteleyn, D. Colle, M. Pickavet, P. Demeester, "Business Model for a Mobile WiMAX Deployment in Belgium", published in "Mobile WiMAX", Chapter 18, ISBN: 978-0-470-51941-7, Edited by K-C Chen, J. R. B. de Marca, Published by John Wiley & Sons, Feb. 2008, pp. 353-375.
- [4] ITU-T Recommendations, "G-series: Transmission systems and media, digital systems and networks" (<http://www.itu.int/rec/T-REC-G/e>).
- [5] DSL Forum (<http://www.dslforum.org/>).
- [6] J. M. Cioffi, S. Jagannathan, M. Mohseni, G. Ginis, "CuPON: The Copper Alternative to PON 100 Gb/s DSL Networks", *IEEE Communications Magazine*, vol. 45, no. 6, pp. 132-139, Jun. 2007.
- [7] Point Topic: Global broadband statistics (<http://www.point-topic.com>)
- [8] DOCSIS (<http://www.docsis.org/>).
- [9] CableLabs (<http://www.cablelabs.com/>).
- [10] P. E. Green, "Fiber-to-the-Home: The Next Big Broadband Thing", *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 9, pp. 100-106, Sep. 2004.
- [11] IEEE 802.3ah Ethernet in the First Mile Task Force (<http://www.ieee802.org/3/ah/>).
- [12] IEEE 802.3av Task Force, 10Gb/s Ethernet Passive Optical Network, (<https://www.ieee802.org/3/av/>).
- [13] ITU-T G.984.1, "Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON):General characteristics," Mar. 2003.
- [14] ITU-T G.984.2, "Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON):Physical Media layer specification," Mar. 2003.
- [15] ITU-T G.984.3, "Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON):Transmission convergence layer specification," Feb. 2004.
- [16] ITU-T G.984.4, "Gigabit-capable Passive Optical Networks (GPON): ONT management and control interface specification," Jun. 2004.
- [17] ITU-T G.984.5, "Enhancement band for gigabit capable optical access networks", Sep. 2007.
- [18] Huawei Digital Power SUSTAINABILITY REPORT, 2021
- [19] Z. Havić, Usporedna analiza arhitektura i scenarija uvođenja optičke pristupne mreže sljedeće generacije, DOKTORSKA DISERTACIJA
- [20] ADVA: Performance, Cost, and Energy Consumption in Next-Generation WDM-based Access *BROADNETS 2010*, Athens, October 2010, pp.1-20.