

ENERGETSKI EFIKASAN ETHERNET

Milan Bjelica

Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet, milan@etf.rs

Sadržaj: *Informaciono-komunikacione tehnologije (ICT) prepoznate su kao značajan potrošač električne energije. Iako pojedinačni Ethernet interfejsi po pravilu imaju snagu manju od 1 W, zbog svoje izuzetne rasprostranjenosti, po principu velikih brojeva, imaju značajan udeo u ukupnoj potrošnji ICT. Nedavno usvojena specifikacija energetski efikasnog Etherneta postala je sastavni deo standarda IEEE 802.3. U radu su prikazana iskustva autora na optimizaciji i modeliranju energetski efikasnih Ethernet mreža. Izloženi koncepti ilustrovani su rezultatima koji su dobijeni merenjima na realnim mrežama.*

Ključne reči: *energetski efikasne mreže, IEEE 802.3, baferisanje paketa, optimizacija*

1. Uvod

Informaciono-komunikacione tehnologije (ICT) unutar Evropske unije učestvuju s 8-10% u ukupnoj potrošnji električne energije i doprinose emisiji ugljen-dioksida u iznosu od 4% [1]. Skorašnje studije pokazuju da potrošnji najviše doprinose korisnički uređaji i *data* centri [2, 3]. Trend porasta emisije CO₂ usled aktivnosti u sektoru ICT trebalo bi da se nastavi u narednih dvadeset godina [3].

Ethernet bez sumnje predstavlja najrasprostranjeniju mrežnu tehnologiju, kako u fiksnim korisničkim uređajima, tako i u *data* centrima. Iako pojedinačni Ethernet interfejsi ne troše mnogo energije – npr. snaga tipičnog 100BASE-TX interfejsa ne prelazi 1 W [4], zbog njihovog ogromnog broja, krajnji iznos uopšte nije zanemariv; na primer, „mali” komutatori, koji imaju manje od 24 interfejsa, samo u SAD godišnje potroše 7,9 TWh električne energije [5]. Imajući to u vidu, jasno je da se i kroz najskromnije smanjenje potrošnje Ethernet interfejsa otvara ogroman prostor za globalne uštede.

Strukovna organizacija IEEE prepoznala je ovaj problem i kroz svoju radnu grupu 802.3az standardizovala tzv. energetski efikasan Ethernet (EEE). Specifikacija ovih mreža sada je sastavni deo Ethernet standarda [6].

U tekstu koji sledi, izloženi su istraživački i projektantski aspekti energetski efikasnih Ethernet mreža iz autorovog desetogodišnjeg iskustva u ovoj oblasti. Rad je organizovan na sledeći način: U odeljku 2, dat je pregled tehnologije EEE u osnovnoj varijanti. Mogućnost dodatne uštede enegije kroz baferisanje paketa pre slanja na link opisana je u trećem odeljku. U četvrtom odeljku predstavljena je simulaciona

optimizacija performansi ovakvih mreža. Rezultati su diskutovani u petom odeljku, dok je u šestom dat zaključak rada.

2. Tehnologija energetski efikasnog Etherneta

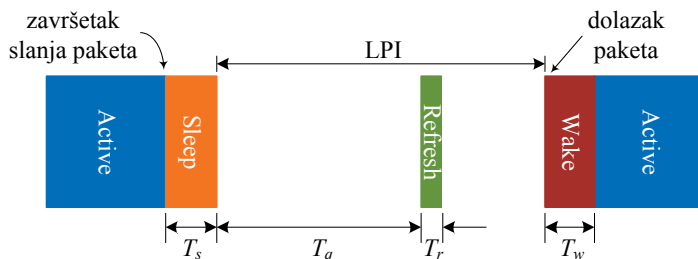
Najveći potrošač energije unutar Ethernet interfejsa je predajni sklop; na današnjem stepenu razvoja tehnike, njegova potrošnja slabo zavisi od toga šalje li se u datom trenutku paket na liniju, ili ne. Kriva potrošnje, naime, ima relativno veliki fiksni deo, koji je posledica potrošnje elektronskih komponenti u mirnoj radnoj tački i daleko manji varijabilni deo koji zavisi od konkretnog podatka koji se šalje na liniju. Pod ovim okolnostima, predajnik neprestano troši vrlo približno konstantan iznos energije, nezavisno od toga šalje li paket, ili je neaktivan.

Jedan pravac rada ka energetski efikasnim Ethernet mrežama bio bi u razvoju elektronskih sklopova sa što linearnijom krivom potrošnje. Dugoročno gledano, ovo bi bilo idealno rešenje, ali danas smo još uvek daleko od njega. Zanimljivo je primetiti da bi tada potrošnja interfejsa zavisila samo od statističkih osobina podataka koji se preko njega razmenjuju; doista, kombinacije bita s čestim tranzicijama između stanja – koje su poželjne sa stanovišta održavanja sinhronizacije između predajnika i prijemnika – zbog forsiranja prelaznih režima imale bi za posledicu i veću potrošnju električne energije nego kada bi se prenosile dugačke sekvence istih bita. Znači li to da bi se praćenjem potrošnje električne energije mogao steći uvid u podatke koji se razmenjuju, tema je za razmišljanje.

Zamislimo sada realniju situaciju u kojoj se predajnik (s jako nelinearnom karakteristikom potrošnje) po završetku slanja *isključuje* i tako smanjuje potrošnju, da bi se ponovo uključio čim u njegov bafer bude stigao naredni paket za slanje. Kada bi se ovo isključivanje i uključivanje mogli signalizirati prijemniku, mogle bi se ostvariti i uštede na prijemnoj strani. Ovakav koncept predstavlja osnov energetski efikasnog Etherneta kako ga je skicirala radna grupa 802.3az; osnovna razlika energetski efikasnog Etherneta u odnosu na „klasični” ogleda se upravo u uvođenju neaktivnog stanja, koje je označeno kao LPI (*Low Power Idle*).

Nažalost, uključivanje i isključivanje predajnika nije moguće izvršiti na nivou pojedinačnih paketa. Naime, elektronskim sklopovima je potrebno konačno vreme da bi se po ukidanju napajanja potpuno isključili i da bi, zatim, po ponovnom uključivanju napajanja uspostavili zahtevani radni režim; ovaj tranzijent prvenstveno je izazvan punjenjem i pražnjenjem parazitnih kapacitivnosti, kako na nivou štampane ploče, tako i integrisanog kola. Imajući u vidu da trajanje najkraćih paketa u Ethernet mrežama realizovanim prema popularnom standardu 100BASE-TX iznosi svega 5,1 ms, bojazan da će trajanje tranzijenta biti uporedivo s trajanjem paketa sasvim je opravdana. Standard, stoga, propisuje uvođenje zaštitnih intervala trajanja T_s (*sleep*) i T_w (*wake*); prvi se odnosi na isključivanje predajnika, tj. prelazak u stanje LPI, a potonji na uključivanje, tj. izlazak iz stanja LPI i ulazak u aktivno stanje. Standardom je dalje propisano da se u stanju LPI periodično šalju tzv. *refresh* poruke, trajanja T_r , s ciljem održavanja sinhronizacije s prijemnikom. Period slanja ovih poruka je T_q ; zanimljivo je primetiti da predajnik i tada ostaje u stanju LPI. Standard opisuje i signalizaciju između predajnika i prijemnika, ali bi njen prikaz izašao izvan okvira ovoga rada.

Na Slici 1, ilustrovan je primer događanja na energetski efikasnom Ethernet linku, s označenim vremenskim intervalima.



Slika 1. Stanja na EEE linku

Minimalne vrednosti T_s i T_w , koje su od značaja za analizu u nastavku rada, navedene su u Tabeli 1.

Tabela 1. Vremenski parametri EEE

Varijanta	T_s [ms]	T_w [ms]
100BASE-TX	30	200
1000BASE-T	16,5	182
10GBASE-T	4,48	2,88

Pitanja koja se sada logično nameću su kolika je iskorišćenost ovakvog linka i kolika se ušteda može postići njegovom primenom. Primitimo da je za slanje paketa trajanja T_F u najpovoljnijem slučaju potrebno vreme $T_w + T_F + T_s$; maksimalna iskorišćenost linka stoga je

$$U = \frac{T_F}{T_w + T_F + T_s} \quad (1)$$

Rezultati, za slučaj najkraćih (72 B) i najdužih (1526 B) paketa, dati su u Tabeli 2. Vidi se da je za atraktivnije varijante s gigabitskim protocima iskorišćenost neprihvatljivo mala.

Tabela 2. Iskorišćenost EEE linka

Varijanta	Najkraći paketi	Najduži paketi
100BASE-TX	2,4%	34,7%
1000BASE-T	0,29%	5,8%
10GBASE-T	0,78%	12,2%

Odgovor na drugo pitanje dali su Reviriego *i dr.* [7]; prema njihovim merenjima, ušteda je primetna samo u uslovima slabog saobraćaja, dok je već pri opterećenjima od 50% skoro neznatna – za opterećen link protoka 100 Mb/s (100BASE-TX) iznosi nešto preko 3%, dok je za link protoka 1 Gb/s (1000BASE-T) još skromnija – 1%. Primećeno je i da potrošnja tokom tranzijenata nije zanemariva, što značajno doprinosi ukupnoj potrošnji.

Analički oblik funkcije potrošnje energetski efikasnog Etherneta dali su Herreira-Alonso *i dr.* [8]. Odnos potrošnje EEE i standardnog Etherneta opisan je izrazom

$$\begin{aligned} \varphi &= \frac{E[P_{EEE}]}{E[P]} = \\ &= 1 - (1 - \varphi_{off})(1 - \rho) \frac{E[T_{off}]}{E[T_{off}] + T_s + T_w} \end{aligned} \quad (2)$$

gde je $\varphi_{off} = E[P_{off}]/E[P]$ odnos potrošnje u LPI i u aktivnom režimu, ρ je iskorišćenost linka, T_{off} trajanje LPI i E operator matematičkog očekivanja. Iz izraza se naslućuje da razlog za skromne performanse „čistog“ EEE leži u priličnom trajanju tranzijenata. Moguće rešenje nalazi se u baferisanju paketa pre slanja na link.

3. Baferisanje paketa

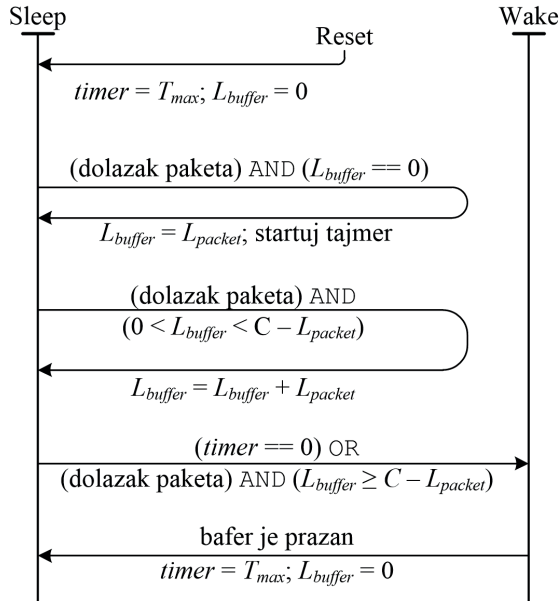
Zamislimo sada da se paketi ne šalju na liniju neposredno po pristizanju u predajnik, već da se najpre skladište u njegovom baferu. U nekom trenutku, bafer će se početi prazniti i uskladišteni paketi će se poslati na liniju u vidu rafala (*burst*). Vremenski interval između susednih rafala može se učiniti dovoljno dugim da bi predajnik tokom njega imao vremena da uđe u LPI, čime se smanjuje potrošnja energije – doduše po cenu povećanja kašnjenja u mreži. Opisana tehnika u literaturi na engleskom jeziku zove se *packet coalescing* i trenutno predstavlja glavni istraživački pravac u oblasti energetski efikasnog Etherneta.

Uslov za pražnjenje bafera po pravilu je dvojak. Bafer se puni (a) dok u njemu ima mesta za prihvatanje novih paketa, ili (b) dok se ne dostigne maksimalno prihvatljivo kašnjenje. Primetimo da se dužim baferisanjem povećava energetska efikasnost, ali takođe i kašnjenje i sporadična priroda saobraćaja (*burstyness*). Postizanje kompromisa između uštede energije i uvedenog kašnjenja predstavlja prvorazredan izazov za projektante energetski efikasnih Ethernet mreža.

U dostupnoj literaturi, uslov (a) po pravilu se izražava u paketima, tj. pražnjenje bafera počinje kada se u njemu nakupi zadati broj paketa. Ovakav pristup verovatno je motivisan klasičnom teorijom servisnih sistema; imajući u vidu da se kapacitet bafera kao memorijskih komponenti izražava u bitima/bajtima, opravdanije je za granicu posle koje se bafer „budi“ posmatrati maksimalan broj bita u njemu, C , kao što je to predloženo u [9]. Ovakav predajnik može se posmatrati kao konačni automat, čiji je dijagram stanja prikazan na Slici 2.

Predajnik je inicijalno neaktivan. Prilikom dolaska prvog paketa, pokreće se tajmer koji odbrojava do T_{max} i ažurira se brojač uskladištenih bita L_{buffer} . Paketi se skladište sve dok tajmer ne dostigne T_{max} ili dok brojač L_{buffer} ne dostigne prag C . Predajnik se potom aktivira i šalje akumulirane pakete na link, u vidu rafala (*burst*).

Paketi koji budu prispeli tokom trajanja rafala takođe će se uključiti u njega. Kada se bafer bude ispraznio, vratiće se u neaktivno stanje i pripremiti za prihvatanje novoga paketa.



Slika 2. Dijagram stanja predajnika EEE s baferisanjem paketa

U uslovima slabog saobraćaja, trajanje LPI određeno je uslovom tajmouta, pa je

$$E[T_{off}] = \frac{\bar{L}}{R} + T_{max} \quad (3)$$

Prvi sabirak opisuje vreme potrebno za pristizanje prvog paketa u prazan bafer, dok drugi odgovara tajmoutu. Nasuprot tome, kada je saobraćaj jak, najpre će se dostići uslov kapaciteta, pa će važiti

$$E[T_{off}] = \frac{C}{R} \quad (4)$$

U gornjim izrazima, R predstavlja protok na dolaznom linku. Primitimo da je u oba slučajeva zavisnost trajanja neaktivnog stanja od protoka hiperbolička. Granična tačka dvaju radnih režima je

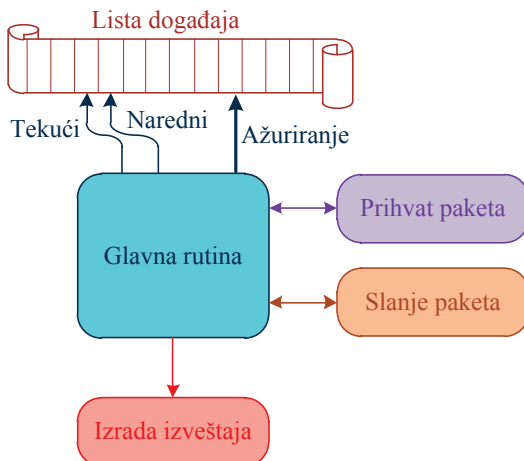
$$R^* = \frac{C - \bar{L}}{T_{max}} \quad (5)$$

4. Optimizacija EEE mreža

U cilju detaljnijeg sagledavanja karakteristika EEE mreža s baferisanjem paketa, razvijen je njihov simulator, čija je logička organizacija ilustrovana na Slici 3.

Simulator je realizovan po principu simulacije diskretnih događaja [10], u konkretnom slučaju dolazaka i odlazaka paketa. Ulazni podaci – trenuci dolazaka paketa i

njihove bitske dužine – predstavljeni su listom događaja, koja se dinamički ažurira tokom izvršavanja simulacije. Glavna rutina čita tekući i naredni događaj, te na osnovu njih i tekućeg stanja poziva module za prihvrat ili slanje paketa, odlučuje o prelasku u novo stanje, ažurira listu događaja i statističke brojače. Po obavljenoj simulaciji, glavna rutina poziva modul za izradu izveštaja, koji računa ostvarenu uštedu električne energije.



Slika 3. Simulator EEE mreža

Programski kod simulatora napisan je u programskom jeziku python.

U analizi koja sledi, korišćeni su logovi saobraćaja dobijeni merenjem na 10GBASE-T linku nacionalnog telekomunikacionog operatora.

Kao što je već rečeno, zahtevi u pogledu kašnjenja i potrošnje energije uzajamno su suprotstavljeni. Da bismo sagledali njihov združeni uticaj na performanse mreže, predložili smo sledeću optimizacionu funkciju cene:

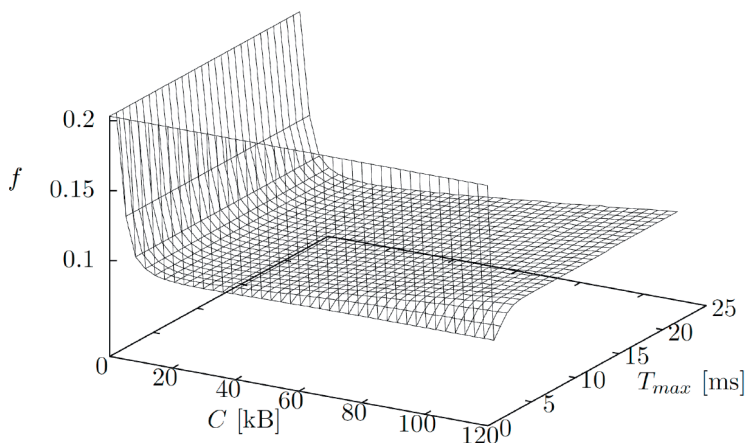
$$f(C, T_{max}) = \gamma \frac{E[P_{EEE}(C, T_{max})]}{E[P]} + (1 - \gamma) \frac{T_{max}}{T_0}, \quad (6)$$

gde je $P_{EEE}(C, T_{max})$ potrošnja EEE predajnika koji koristi baferisanje, s baferom kapaciteta C i tajmerom koji odbrojava do T_{max} . S T_0 označena je normalizaciona konstanta, dok je $\gamma \in [0, 1]$ tzv. *trade-off* parametar, čijim se izborom naglašava značaj uštede energije ($\gamma \rightarrow 1$) ili dopuštenog kašnjenja ($\gamma \rightarrow 0$). Rezultati simulacije, za $\gamma = 0,5$ i $T_0 = 20$ ms, prikazani su na Slici 4.

Optimalna radna kriva bafera sada se dobija kao

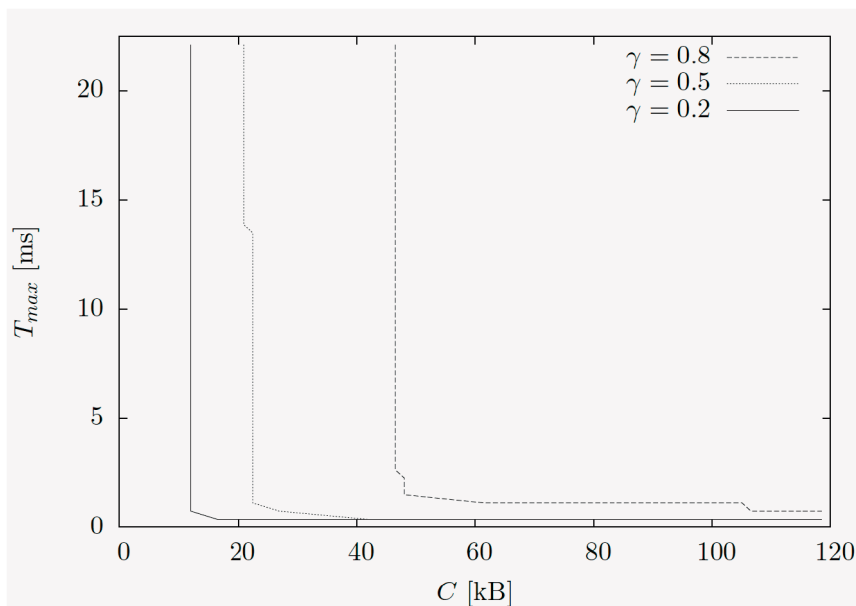
$$\begin{cases} (C, T_{max})_{opt} = \arg \min f(C, T_{max}) \\ (C, T_{max}) > (0, 0) \end{cases}, \quad (7)$$

dok se optimalna radna tačka može postaviti u njenom kolenu. Za posmatranu sekvencu saobraćaja, dobili smo vrednosti $(C, T_{max})_{opt} = (24 \text{ kB}, 0,8 \text{ ms})$.



Slika 4. Vrednosti funkcije cene

Ponavljanjem opisanog postupka za druge vrednosti parametra γ , identifikovali smo optimalne radne krive koje su prikazane na Slici 5, dok su parametri odgovarajućih optimalnih radnih tačaka navedeni u Tabeli 3.



Slika 5. Optimalne radne krive bafera

Tabela 3. Optimalne radne tačke bafera

γ	C [kB]	T_{max} [ms]
0,2	11,2	0,5
0,5	24,0	0,8
0,8	55,2	1,3

U poslednjoj seriji eksperimenata, posmatrali smo dve sekvence saobraćaja čiji su parametri dati u Tabeli 4.

Tabela 4. Parametri uzoraka saobraćaja

Parametar	Uzorak #1	Uzorak #2
Broj paketa	149999	49701
Prosečna dužina paketa	82,7 B	860 B
Prosečan protok	203 Mb/s	397 Mb/s
Iskorišćenost linka	2%	4%

Podaci o ostvarenom prosečnom kašnjenju (u odnosu na izvorni EEE u kome se ne koristi baferisanje) i relativnoj potrošnji energije (u odnosu na izvorni Ethernet) za optimalno konfigurisane bafere i posmatrane sekvence saobraćaja navedeni su u Tabeli 5.

Tabela 5. Performanse sistema

Parametar	Uzorak #1			Uzorak #2		
	$\gamma = 0,2$	$\gamma = 0,5$	$\gamma = 0,8$	$\gamma = 0,2$	$\gamma = 0,5$	$\gamma = 0,8$
Prosečno kašnjenje [ms]	0,390	0,746	1,296	0,220	0,466	1,026
Relativna potrošnja	0,17	0,15	0,13	0,27	0,26	0,25

5. Diskusija

Primitimo, najpre, da oba posmatrana uzorka odgovaraju uslovima slabog saobraćaja; ne čudi, stoga, što se primenom baferisanja u njima mogu ostvariti značajne uštede energije – do 87% za prvi uzorak, uz $\gamma = 0,8$. Povećavanjem vrednosti *trade-off* parametra γ doista se povećava ušteta (tj. smanjuje potrošnja), uz povećavanje kašnjenja, ali ova dva priraštaja nisu jednakih intenziteta – kašnjenje je daleko osetljivije na varijaciju γ , nego što je to slučaj s potrošnjom energije. Objašnjenje se ponovo krije u statističkim osobinama razmatranih sekvenci, tj. u maloj iskorišćenosti linka od svega nekoliko postotaka. Imajući to u vidu, pri optimizaciji ovakve mreže opredelili bismo se

za radnu tačku koja minimizira kašnjenje, tj. $\gamma=0,2$. Tokom eksploatacije, bilo bi poželjno periodično ponoviti snimanje saobraćaja i ocenu njegovih statističkih parametara, te po potrebi korigovati parametre radne tačke.

6. Zaključak

U radu je prikazano aktuelno stanje u analizi i optimizaciji energetske efikasnosti Ethernet mreža. Još tokom njihove standardizacije, postalo je jasno da se samim uvođenjem neaktivnog stanja neće moći ostvariti značajnije uštede potrošnje energije. Kao *ad hoc* rešenje, predloženo je baferisanje paketa pre slanja, čime se, međutim, otvorilo pitanje podešavanja radnog režima bafera i njegovog uticaja na kašnjenje i zagušenje u mreži. Dok čekamo razvoj brzih elektronskih komponenti koje će skratiti prelazne režime pri isključivanju i uključivanju predajnika, ili modifikaciju standarda – u stručnim krugovima već se pominje uvođenje dvaju neaktivnih stanja, jednog koje bi odgovaralo „dubokom” i drugom koje bi odgovaralo „lakom” snu – ostaje da se EEE mreže dimenzionišu tako da se ostvari kompromis oprečnih zahteva; u tome smislu, ovaj rad nudi nekoliko rezultata dobijenih posmatranjem operativne mreže, koji mogu biti od pomoći projektantima.

Zahvalnica

Rad je delimično pomognut sredstvima Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije kroz projekat „Razvoj visokokvalitetnih uređaja posebne namene na bazi novih tehnologija kristalnih jedinica – TR32048”.

Literatura

- [1] European Framework Initiative for Energy & Environmental Efficiency in the ICT Sector. [online] <https://ictfootprint.eu/es/about/ict-carbon-footprint/ict-carbon-footprint>. Pristupljeno 30.9.2018.
- [2] J. Malmodin and D. Lundén, “The energy and carbon footprint of the global ICT and E&M sectors 2010-2015” In B. Penzenstadler, S. Easterbrook, C. Venters and S.I. Ahmed (eds.), *ICT4S2018, EPiC Series in Computing*, vol. 52, pp. 187-208, 2018.
- [3] L. Belkhir, A. Elmeligi, “Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 177, pp. 448-463, March 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2017.12.239
- [4] *AN-1540 Power Measurement of Ethernet Physical Layer Products*, Application Report SNLA089B, November 2006 - Revised April 2013, Texas Instruments Incorporated
- [5] M. Mostowfi and K. Christensen, “Saving energy in LAN switches: New methods of packet coalescing for Energy Efficient Ethernet”, International Green Computing Conference and Workshops (IGCC), 2011, doi: 10.1109/IGCC.2011.6008547
- [6] *IEEE Standard for Ethernet*, IEEE Std 802.3-2015 (Revision of IEEE Std 802.3-2012), March 2016, doi: 10.1109/IEEESTD.2016.7428776

- [7] P. Reviriego, K. Christensen, J. Rabanillo, and J. A. Maestro, "An Initial Evaluation of Energy Efficient Ethernet", *IEEE Comm. Letters*, vol. 15, pp. 578-580, May 2011, doi: 10.1109/LCOMM.2011.040111.102259
- [8] S. Herrera-Alonso, M. Rodrigues-Perez, M. Fernandez-Veiga and C. Lopez-Garcia, "A GI/G/1 model for 10Gb/s energy efficient Ethernet links", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 60, pp. 3386-3395, November 2012.
- [9] M. Aksić and M. Bjelica, "Packet coalescing strategies for energy-efficient Ethernet", *Electronics Letters*, vol. 50, pp. 521-523, March 2014, doi: 10.1049/el.2014.0386
- [10] A. Law, *Simulation, modeling & analysis*. New York, NY: McGraw-Hill, 2007.

Abstract: *Information and Communications Technologies (ICT) are recognized as a substantial electricity consumer. Although a single Ethernet interface does not draw more than 1 watt of power, due to their ubiquitous nature they significantly contribute to the overall ICT consumption. Recently adopted Energy Efficient Ethernet specification has become an integral part of the IEEE 802.3 standard. This paper outlines the experiences on energy efficient Ethernet optimization and modeling. The presented framework is illustrated on real-world traffic measurements.*

Keywords: *energy efficient networking, IEEE 802.3, packet coalescing, optimization*

ENERGY EFFICIENT ETHERNET

Milan Bjelica