



Univerzitet Crne Gore

Univerzitet Crne Gore  
**ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**

81000 Podgorica, Dž. Vašingtona bb, tel. (020) 245 839, fax: (020) 245 873  
Ž.R. 510-255-51, PIB: 02016702 302, PDV: 30/31-03951-6



Broj: 02/1-1496  
Datum: 13.09.2019

**UNIVERZITET CRNE GORE**  
- Centru za doktorske studije -  
- Senatu -

**O V D J E**

U prilogu dostavljamo Odluku Vijeća Elektrotehničkog fakulteta sa sjednice od 12.09.2019. godine i **obrazac D3**, sa pratećom dokumentacijom, za kandidata mr **Slavicu Tomović**, na dalji postupak.



**Đ. F. K A N,**

**Prof. dr. Saša Mujović**





Univerzitet Crne Gore

Univerzitet Crne Gore  
**ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**

81000 Podgorica, Dž. Vašingtona bb, tel. (020) 245 839, fax: (020) 245 873  
Ž.R. 510-255-51, PIB: 02016702 302, PDV: 30/31-03951-6



Broj: 02/1-1483  
Datum: 12.09.2019

Na osnovu člana 64 Statuta Univerziteta Crne Gore, u vezi sa članom 55 Pravila doktorskih studija, Vijeće Elektrotehničkog fakulteta u Podgorici, na sjednici od 12.09.2019. godine, donijelo je

### ODLUKU

#### I

Prihvata se Izvještaj Komisije za ocjenu doktorske disertacije „**Analiza performansi novih tehnika za inženjering saobraćaja u ISP mrežama naredne generacije**“, kandidata mr **Slavice Tomović**.

#### II

Predlaže se Senatu Univerziteta Crne Gore da prihvati disertaciju „**Analiza performansi novih tehnika za inženjering saobraćaja u ISP mrežama naredne generacije**“, kandidata mr **Slavice Tomović**.

i imenuje Komisiju za odbranu doktorske disertacije, u sastavu:

1. Dr Zoran Čiča vanredni profesor Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu,
2. Dr Igor Radosinović, redovni profesor Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta Crne Gore,
3. Dr Gordana Gardašević, vanredni profesor Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Banjoj Luci,
4. Dr Vesna Popović-Bugarin, vanredni profesor Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta Crne Gore, član
5. Dr Mirko Sužnjević, docent na Fakultetu elektrotehnike i računarstva, Sveučilišta u Zagrebu.

**-VIJEĆE ELEKTROTEHNIČKOG FAKULTETA-**



DEKAN,

Prof. dr Saša Mujović

Dostavljeno:

- Centru za doktorske studije,
- Senatu,
- u dosije,
- a/a.



## OCJENA DOKTORSKE DISERTACIJE

OPŠTI PODACI O DOKTORANDU	
Titula, ime i prezime	mr Slavica Tomović
Fakultet	Elektrotehnički fakultet u Podgorici
Studijski program	Doktorske studije Elektrotehnike
Broj indeksa	2/15
MENTOR/MENTORI	
Prvi mentor	Prof. dr Igor Radusinović Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore, Podgorica, Crna Gora
KOMISIJA ZA OCJENU DOKTORSKE DISERTACIJE	
Prof. dr Milica Pejanović Đurišić	Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore, Podgorica, Crna Gora
Prof. dr Igor Radusinović	Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore, Podgorica, Crna Gora
Prof. dr Zoran Čiča	Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Beograd, Srbija
Datum značajni za ocjenu doktorske disertacije	
Doktorska disertacija i Izvještaj Komisije dostavljen Biblioteci UCC	03.07.2019.
Javnost informisana (dnevne novine) da su Doktorska disertacija i Izvještaj Komisije dati na uvid	04.07.2019
Sjednica Senata na kojoj je izvršeno imenovanje Komisije za ocjenu doktorske disertacije	04.06.2019.
Uvid javnosti	
U predviđenom roku za uvid javnosti bilo je primjedbi?	NE
OCJENA DOKTORSKE DISERTACIJE	
<b>1. Pregled disertacije</b>	
<p>Doktorska disertacija pod nazivom: „Analiza performansi novih tehnika za inženjering saobraćaja u ISP mrežama naredne generacije“, kandidatkinje mr Slavice Tomović sadrži 163 stranice A4 formata. Sastoji se od uvoda, 6 poglavlja, zaključka, spiska literature sa 132 citirane bibliografske jedinice i priloga. Disertacija sadrži 54 slike i 12 tabela.</p> <p>U disertaciji je analiziran problem inženjeringa saobraćaja (<i>Traffic Engineering</i> – TE) u softverski-definisanim mrežama (<i>Software Defined Networks</i> - SDN) Internet Servis Provajdera (ISP). Predloženo je više originalnih TE algoritama koji se mogu iskoristiti za unapređenje BoD (<i>Bandwidth on Demand</i>) servisa. Predloženi algoritmi omogućavaju pouzdan prenos podataka uz garanciju kašnjenja i propusnosti. Pri tome, obrada korisničkih zahtjeva vrši se u realnom vremenu, a prisustvo SDN uređaja zahtijeva se samo na ivici mreže. Doprinos u odnosu na postojeća istraživanja u TE oblasti predstavlja i analiza kompromisa između optimalnosti šeme rutiranja i učestanosti rekonfiguracija. Dobijeni rezultati pokazuju da predložena rešenja</p>	

ostvaruju značajna poboljšanja u odnosu na konvencionalne TE tehnike i *state-of-the-art* tehnike koje su bazirane na višekriterijumskoj optimizaciji. Najefikasnija od predloženih rešenja implementirana su na OpenFlow kontroleru i eksperimentalno verifikovana.

U uvodu disertacije su istaknuti ključni izazovi sa kojima se suočavaju ISP provajderi uslijed sve strožijih QoS (*Quality of Service*) zahtjeva savremenih Internet aplikacija. Dat je pregled postojećih tehnika za garanciju kvaliteta servisa i inženjering saobraćaja, i istaknute su njihove prednosti i nedostaci. Objasnjeno je koncept softverski definisanog umrežavanja (SDN), na kojem će biti bazirane mreže naredne generacije, kao i mogućnosti koje SDN nudi za inženjering saobraćaja i virtuelizaciju mreže. Rezimirana su *state-of-the-art* SDN TE rešenja, koja su dominantno dizajnirana za DC (*Data Center*) i *inter-DC* mreže, i objašnjeno je zbog čega ova rešenja ne mogu ispuniti ključne zahtjeve ISP provajdera. Pored toga, jasno su definisani ciljevi disertacije.

U prvoj glavi („Izazovi u razvoju ISP mreža naredne generacije”) objašnjeni su trendovi i pravci razvoja mreža naredne generacije, kao i ograničenja koja predstavljaju značajan izazov prilikom njihovog dizajniranja i implementacije. Dat je pregled novih servisnih scenarija koji su motivisali 5G inicijativu. Takođe, predstavljeni su QoS zahtjevi koje 5G mreže treba da ispune. Zatim, objašnjen je trend mrežne softverizacije, kao i uloga SDN i NFV (*Network Function Virtualization*) tehnologija u 5G sistemima. Detaljno su analizirane karakteristike OpenFlow protokola, koji je iskorišćen za realizaciju TE rešenja predloženih u tezi. Na kraju poglavlja diskutovane su mogućnosti SDN-a za unapređenje i proširenje servisnog portfolia ISP provajdera.

U drugoj glavi („Upravljanje saobraćajem”) dat je pregled TE rešenja iz literature koja su dizajnirana za tradicionalne MPLS (*MultiProtocol Label Switching*) i IP (*Internet Protocol*) mreže. Rešenja su klasifikovana po kriterijumu dinamike izvršavanja na *online* i *offline*. Posebno su istaknuti nedostaci ovih rešenja koje je moguće prevazići SDN mrežnom arhitekturom. Takođe, predstavljeni su različiti saobraćajni modeli koji se koriste prilikom definisanja optimizacionih TE problema. Za svaki od analiziranih saobraćajnih modela formulisan je problem minimizacije maksimalne iskorišćenosti linkova (*Maximum Link Utilization* - MLU), koji ima veliki praktični značaj u ISP mrežama. Prezentovani su i različiti pristupi rešavanju višekriterijumskih TE problema.

U trećoj glavi („Tehnike za garanciju kvaliteta servisa”) razmatrane su tehnike za pružanje QoS garancija na nivou mreže. Objasnjene su dvije ključne QoS arhitekture koje je standardizovao IETF (*Internet Engineering Task Force*): IntServ i DiffServ, a zatim su identifikovane dodatne QoS mogućnosti koje nudi OpenFlow protokol u SDN mrežama. Izvršena je klasifikacija osnovnih QoS problema rutiranja i diskutovana je njihova računaska kompleksnost.

U četvrtoj glavi („Predlog kontrolnog okruženja za inženjering saobraćaja u SD-ISP mrežama”) predstavljen je originalni dizajn SDN kontrolera, kod kojeg je u cilju poboljšanja skalabilnosti logika za kontrolu saobraćaja organizovana u dva modula: (i) modul za *online* rutiranje i kontrolu pristupa, i (ii) *offline* TE modul, koji periodično optimizuje težinske faktore za balansiranje saobraćajnog opterećenja. Predstavljen je matematički model *offline* TE algoritma, koji optimizacionu funkciju bazira na minimizaciji MLU, a kao optimizaciona ograničenja koristi zahtjeve saobraćajnih tokova u pogledu propusnosti, kašnjenja i pouzdanosti. Predloženo rešenje je upoređeno sa konvencionalnim i *state-of-the-art* rešenjima slične namjene u pogledu procenta odbijenih QoS zahtjeva, prosječne MLU vrijednosti i generisanog kontrolnog *overhead*-a. Algoritmi su upoređeni po više kriterijumima i pri različitim parametrima sistema, kako bi se

izveli što potpuniji zaključci o njihovim performansama i ponašanju u različitim uslovima implementacije.

U petoj glavi („Predlog TE rešenja sa kontrolisanim rekonfiguracijama: RO-RO”) identifikovani su problemi koji nastaju kao rezultat rekonfiguracija mreže za potrebe inženjeringa saobraćaja. Predložen je bi-kriterijumski TE optimizacioni model koji teži simultano da minimizuje „troškove” rutiranja i učestanost rekonfiguracija. Pri tome, za razliku od konkurentskog rešenja iz literature, polazna pretpostavka je da statistički model mrežnih događaja nije unaprijed poznat. Predloženo rešenje nije bazirano na klasičnom rešavanju bi-kriterijumskog optimizacionog problema, gdje se kompromisno rešenje iz Pareto seta bira statičkim težiranjem vrijednosti optimizacionih funkcija. Težiranje optimizacionih funkcija vrši se na osnovu ograničenja u pogledu srednje dozvoljene učestanosti rekonfiguracija, koje zadaje mrežni operator. Ovo ograničenje modelovano je virtuelnim baferom koji se vremenom popunjava kada srednja učestanost rekonfiguracija pređe kritičnu vrijednost. Za izbor najefikasnijeg Pareto optimalnog rešenja primijenjen je Lyapunov *drift-plus-penalty* algoritam, koji teži da minimizuje zauzetost virtuelnog bafera i „troškove” rutiranja. Na ovaj način, praćenjem zauzetosti virtuelnog bafera, indirektno je ostvareno dinamičko težiranje primarnih optimizacionih funkcija. S obzirom da analizirani bi-kriterijumski optimizacioni problem pripada klasi NP-complete problema, predložena je i heuristika koja omogućava efikasno rešavanje velikih problemskih instanci.

Predložena TE rešenja koja su se po više kriterijuma pokazala pogodnim za praktičnu primjenu, implementirana su na OpenFlow/SDN kontroleru. Detalji implementacije i rezultati eksperimentalne evaluacije dati su u šestoj glavi („Eksperimentalni rezultati”).

U zaključku disertacije su date završne konstatacije i zapažanja sa osvrtom na realizovano istraživanje, njegov značaj, kao i mogućnosti rada na budućim istraživanjima u ovom pravcu.

## 2. Vrednovanje disertacije

### 2.1. Problem

Usled ekspanzije *Internet of Things* (IoT) sistema u automobilskoj industriji, zdravstvu i energetici, kao i sve veće popularnosti aplikacija proširene i virtuelne stvarnosti, garancija ultra-pouzdanе komunikacije sa malim kašnjenjem postaje ključni izazov u ISP mrežama. Kako bi održali korak za pomenutim trendovima i pružili adekvatan kvalitet servisa u uslovima velikog saobraćajnog opterećenja, ISP provajderi primjenjuju visok stepen redundanse u svojim mrežama. U okosnici mreže koriste se linkovi 2-3 puta većeg kapaciteta u odnosu na njihovo prosječno opterećenje. S obzirom da ovakav pristup nije ekonomski održiv, istraživačka zajednica ulaže velike napore u razvoj naprednih tehnika za inženjering saobraćaja (TE).

TE tehnike su od krucijalne važnosti za provajdere Internet servisa jer omogućavaju optimizaciju mrežnih performansi, efikasno korišćenje mrežnih resursa i smanjenje operativnih troškova. Podrška za inženjering saobraćaja uvedena je još u ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) i IP/MPLS mrežama. Međutim, pokazalo se da ove tehnologije i odgovarajuće TE tehnike ne mogu ispuniti zahtjeve mreža naredne generacije, iz dva razloga. Prvo, savremene Internet aplikacije zahtijevaju da kontrolna ravan mreže donosi i sprovodi kontrolne odluke u skoro realnom vremenu, i da bude dovoljno skalabilna da se izbori sa ogromnom količinom saobraćaja. Mrežna arhitektura bi trebalo da bude u stanju da klasifikuje saobraćaj različitih aplikacija, i da pruži odgovarajući tip servisa svakoj od klasa u kratkom vremenskom periodu (npr. reda milisekundi). Drugo,

današnjim mrežama su neophodni inteligentniji efikasniji alati za balansiranje saobraćajnog opterećenja kako bi odgovorile na izazove koje nameću rapidan razvoj Cloud tehnologija i IoT servisa. Međutim, konvencionalne TE tehnologije bazirane su na zatvorenom i nefleksibilnom dizajnu mrežne arhitekture, gdje su kontrolna ravan i ravan podataka integrisane na svakom uređaju. Distribuirana kontrolna ravan onemogućava dinamičku analizu i regulaciju stanja u mreži, uslijed čega mreža nije stanju da se prilagodi rastućim i veoma varijabilnim obascima saobraćaja.

Softverski-definisano umrežavanje (SDN) predstavlja novi model mrežne arhitekture kod koje je kontrolna ravan razdvojena od ravni podataka i logički centralizovana na kontrolerskom uređaju. SDN kontroler predstavlja pogodnu platformu za implementaciju sofisticiranih TE algoritama u formi centralizovanih aplikacija koje imaju globalni uvid u stanje mreže i mogu dinamički mijenjati mrežnu konfiguraciju u cilju poboljšanja sveukupnih performansi. Potencijal SDN mrežne arhitekture za poboljšanje iskorišćenosti mrežnih resursa već je uspješno demonstriran u DC, *inter-DC* i kampus mrežama. Međutim, primjena SDN-a u ISP mrežama počela je da privlači pažnju tek nedavno, i za sada predstavlja nedovoljno istraženu oblast u kojoj se očekuju novi naučno-istraživački doprinosi. Specifičnost problema inženjeringa saobraćaja u ISP mrežama ogleda se u tome što nije moguće kontrolisati dolazne saobraćajne tokove na način koji je uobičajen u DC i *inter-DC* mrežama. Naime, u DC i *inter-DC* mrežama moguće je dinamički kontrolisati brzinu generisanja saobraćaja i planirati vremenski raspored saobraćajnih tokova kada je to potrebno. Na ovaj način moguće je izbjeći iznenadne fluktuacije saobraćaja i spriječiti zagušenje mrežnih linkova. Sa druge strane, ISP mreže nemaju ovu privilegiju jer klijentima moraju pružiti QoS garancije specificirane u SLA (*Service Level Agreement*) ugovorima. U literaturi je predloženo više TE tehnika koje teže da minimizuju vjerovatnoću blokiranja QoS zahtjeva. Međutim, predložena rešenja dominantno su dizajnirana za klasični BoD servis, čiji je fokus na garanciji propusnosti. Sa druge strane, garancija kašnjenja i pouzdanosti je nedovoljno istražena, uprkos značaju koji ima za veliki broj aplikacija.

U uobičajenoj klasifikaciji TE algoritma ističu se dvije komplementarne forme: *online* i *offline*. Osnovna razlika između *offline* i *online* TE tehnika je (ne)dostupnost saobraćajne matrice i vremenski okvir manipulacije saobraćajem. *Offline* TE rešenja periodično vrše optimalno mapiranje prognozirane matrice saobraćaja na fizičku topologiju. Optimizacija mrežne konfiguracije vrši se u dužim vremenskim okvirima, tipično jednom dnevno, nedeljno ili mjesečno. Glavna slabost ovog pristupa je što nije moguće adaptirati konfiguraciju mreže dinamici saobraćaja i događajima kao što su ispadi linkova i rutera. *Online* TE tehnike dinamički kontrolišu mrežu ne zahtijevajući informacije o očekivanoj matrici saobraćaja. Osnovni zadatak *online* algoritama je optimalno balansiranje opterećenja linkova prilikom rutiranja novih saobraćajnih tokova (jedan po jedan) tako da mreža može zadovoljiti proizvoljnu buduću saobraćajnu potražnju bez ulaska u zagušenje. U nekim slučajevima, *online* TE algoritmi vrše rerutiranje postojećih tokova u mreži u cilju ispunjenja QoS zahtjeva novih tokova. Međutim, rerutiranje je obično ograničeno na mali broj tokova kako se ne bi ugrozila mrežna stabilnost i kvalitet servisa. S obzirom da kompletni saobraćajni uslovi nisu poznati, *online* TE rešenja ne mogu obezbijediti optimalnu konfiguraciju ruta.

Iako SDN nudi nove mogućnosti za efikasno upravljanje saobraćajem, u većim mrežama centralizovana kontrolna ravan nameće brojne izazove u pogledu skalabilnosti. Da bi obezbijedio optimalan rad mreže, SDN kontroler mora da reaguje na promjene saobraćaja i događaje u mreži u realnom vremenu. Ovo zahtijeva rešavanje TE optimizacionih problema u uskim vremenskim okvirima i rekonfiguraciju tabela tokova SDN uređaja na osnovu rezultata optimizacije. Međutim,

česte rekonfiguracije negativno se odražavaju na kvalitet servisa jer kontroler mora da ukloni stare rute i uspostavi nove, rizikujući privremena zagušenja linkova i kreiranje petlji rutiranja. Uobičajeni pristup rešavanju ovog problema je periodično izvršavanje TE algoritma u dovoljno velikim vremenskim razmacima. Tako, na primjer, u komercijalnim ISP mrežama TE algoritam se obično izvršava u intervalima od jednog sata ili više. Manja učestanost optimizacija znači veću pouzdanost i stabilnost mreže, ali mreža koristi neoptimalnu konfiguraciju duže vremena, što može biti kritično kada se uslovi u mreži mijenjaju nepredvidljivo. U novijoj literaturi predloženo je nekoliko sofisticiranih pristupa. Međutim, predložna rešenja su ili bazirana na pretpostavci da su karakteristike stohastičkih procesa koji odgovaraju različitim događajima u mreži (dolasci i odlasci tokova, kvarovi) unaprijed poznate, što je u praksi teško očekivati, ili na kompleksnim optimizacionim modelima koji nisu pogodni za praktičnu primjenu.

## 2.2. Ciljevi i hipoteze disertacije

Osnovna hipoteza doktorske disertacije je da se primjenom SDN TE rešenja može poboljšati servisni kapacitet ISP mreža. Problem neskalabilnosti SDN kontrolne ravni moguće je prevazići balansiranjem opterećenja preko proaktivno instaliranih tunela u ravni podataka i adekvatnim kombinovanjem *offline* TE mehanizama i *online* algoritama rutiranja. Pri tome, poželjna strategija je da *offline* TE algoritmi periodično optimizuju mrežnu konfiguraciju na kontrolisan način, i da pružaju potrebne smjernice *online* algoritmima rutiranja tako da odabrane rute ne stvaraju „interferenciju” budućim saobraćajnim zahtjevima.

U skladu sa hipotezom definisani su sledeći ciljevi doktorske disertacije:

- Utvrditi prednosti i nedostatke *state-of-the-art* TE tehnika;
- Utvrditi set zahtjeva ISP provajdera koje je neophodno uzeti u obzir u optimizacionom modelu za inženjering saobraćaja u ISP mrežama;
- Matematički formulisati problem inženjeringa saobraćaja u ISP mrežama pod ograničenjima u pogledu propusnosti, kašnjenja i pouzdanosti za svaki od uspostavljenih virtuelnih linkova;
- Predložiti TE rešenja koja koriste prednosti SDN-a na ivici mreže, pri čemu konvencionalna MPLS oprema može biti korišćena u jezgru mreže;
- Analizirati kompromis između efikasnosti inženjeringa saobraćaja i prosječne učestanosti rekonfiguracija; Matematički formulisati bi-kriterijumski optimizacioni problem koji minimizuje „troškove” rutiranja i broj rekonfiguracija.
- Predložiti TE heuristiku prihvatljive računске kompleksnosti u skladu sa definisanim optimizacionim kriterijumima.
- Implementirati predložena TE rešenja na OpenFlow kontroleru.

## 2.3. Bitne metode koje su primijenjene u disertaciji

U skladu sa temom disertacije, predmetom istraživanja i postavljenim ciljevima, u toku izrade doktorske disertacije performanse različitih algoritama za inženjering saobraćaja upoređene su metodama simulacione i emulacione analize. Tokom polaznih istraživanja razvijen je originalni simulator u Python programskom jeziku. Simulacije i eksperimenti su rađeni za PoP (*Point of Presence*) model realne ISP mreže koja je izložena velikom saobraćajnom opterećenju. Prosječna vrijednost matrice saobraćaja generisana je u skladu sa *gravity* modelom. Dinamički dolasci saobraćajnih tokova modelovani su Poasonovim dolaznim procesima, čije prosječno trajanje ima eksponencijalnu raspodjelu. Parametri Poasonove i eksponencijalne raspodjele birani su u skladu

sa maksimalnim intenzitetom saobraćaja koji mreža može da podrži. Predložene tehnike za inženjering saobraćaja, koje su ključni doprinos istraživanja, oslanjaju se na algoritme mješovitog cjelobrojnog linearnog programiranja.

#### 2.4. Rezultati disertacije i njihovo tumačenje sa zaključcima

Prvi proklamovani zadatak doktorske disertacije, a ujedno i njen prvi važan doprinos, je detaljna analiza literature iz oblasti inženjeringa saobraćaja. Na osnovu identifikovanih nedostataka postojećih TE rešenja za ISP mreže, razvijeno je više novih rešenja koje se oslanjaju na mogućnosti SDN tehnologije. Dok su radovi u ovoj oblasti dominantno fokusirani na optimizaciju iskorišćenosti resursa ISP mreže, zanemarujući aspekt kvaliteta servisa, kandidatkinja je istraživanja prilagodila zahtjevima mreža narednih generacija, gdje je garancija performansi jedan od ključnih zahtjeva. Razmatrane su tri metrike kvaliteta servisa: propusnost, kašnjenje i pouzdanost.

U disertaciji je predloženo originalno SDN kontrolno okruženje za ISP mreže, za koje je karakteristična organizacija logike za upravljanje saobraćajem u *online* i *offline* modul. *Online* modul nudi interfejs prema krajnjim korisnicima, prihvata njihove BoD (*Bandwidth on Demand*) zahtjeve, sprovodi kontrolu pristupa na osnovu trenutne dostupnosti resursa u mreži, i instalira nove rute ukoliko je to potrebno. Sve navedene operacije izvršavaju se u skoro realnom vremenu. Optimizacija iskorišćenosti mrežnih resursa delegirana je *offline* modulu, koji periodično vrši inženjering saobraćaja uzimajući u obzir QoS ograničenja u pogledu propusnosti, kašnjenja i pouzdanosti, za svaki pojedinačni korisnički zahtjev. Na ovaj način djelimično je „žrtvovana“ optimalnost rutiranja u cilju smanjenja vremena odziva na BoD zahtjev. Istraživanja kandidatkinje su orijentisana ka unapređenju servisnog portfolia ISP provajdera, koji je danas dominantno ograničen na dugoročno iznajmljivanje privatnih linija (virtuelnih linkova) sa rezervisanim kapacitetom. Predloženi dizajn SDN kontrolera podržava fleksibilni BoD servis, koji omogućava korisnicima da dinamički skaliraju QoS parametre svojih konekcija u skladu sa trenutnim potrebama, na potpuno automatizovan način.

Za predloženi dizajn SDN kontrolera razvijeno je više TE algoritama, razmatrajući različite kriterijume za optimizaciju mrežnih performansi. Najprije, u disertaciji je predstavljen SDN-LB algoritam, koji optimizacionu funkciju bazira na minimizaciji maksimalne iskorišćenosti linkova (MLU – *Maximum Link Utilization*), a kao optimizaciona ograničenja koristi zahtjeve saobraćajnih tokova u pogledu propusnosti, kašnjenja i robustnosti na otkaze linkova. Odgovarajući optimizacioni model, koji se karakteriše velikom računskom kompleksnošću, uprošćen je tako da može biti riješen u polinomijalnom vremenu. Performanse predloženog TE pristupa upoređene su sa CSPF (*Constrained Shortest Path First*) pristupom, koji je dominantno zastupljen u današnjim MPLS mrežama, *oblivious* TE pristupom baziranim na *hose* saobraćajnom modelu, i TE rešenjima koja koriste pogodnosti fleksibilnog SDN rutiranja u jezgru mreže. Simulacioni rezultati pokazali su da predloženo rešenje pruža bolje performanse od klasičnog CSPF i *oblivious* TE pristupa čak i kada se *offline* TE modul izvršava periodično, u dužim vremenskim intervalima. Dobijeni rezultati takođe pokazuju da pri odgovarajućoj učestanosti TE optimizacija predloženi pristup ostvaruje servisni kapacitet relativno blizak onom koji se postiže u mrežama sa SDN jezgrom. Pri tome, značajno smanjuje kontrolni *overhead*.

Posebna pažnja posvećena je analizi uticaja dinamičkog inženjeringa saobraćaja na stabilnost mreže. Predložen je novi TE algoritam (*Routing Optimality - Reconfiguration Overhead balance - RORO*) koji minimizuje dvije konfliktne optimizacione funkcije: MLU i broj rekonfiguracija. RO-RO algoritam vrši dinamičku prioritizaciju razmatranih optimizacionih funkcija primjenom



Lyapunov *drift-plus-penalty* algoritma prilikom izbora rešenja iz Pareto fronta. Kao ulazni parametar algoritmu se zadaje ograničenje u pogledu prosječne učestanosti rekonfiguracija. RO-RO dopušta veći broj rekonfiguracija od kritične vrijednosti u slučaju kada šema rutiranja značajno odstupa od optimalne. Međutim, posmatrano na dužem vremenskom intervalu, rekonfiguracije su pažljivo kontrolisane tako da njihov broj nikada značajnije ne prelazi vrijednost koju preferira mrežni operator. S obzirom da je RO-RO optimizacioni problem NP-complete, predložena je i heuristika koja omogućava efikasno rešavanje problemskih instanci u ISP mrežama kompleksnih topologija. Dobijeni simulacioni rezultati su pokazali da predložena heuristika, sa manjom računskom kompleksnošću, ostvaruje bolje performanse od *state-of-the-art* konkurentskih TE rešenja iz literature, a pri tome ne zahtijeva poznavanje karakteristika stohastičkih procesa koji odgovaraju različitim događajima u mreži (odlasci i dolasci saobraćajnih tokova, ispadi linkova itd.). U disertaciji je takođe pokazano da se efikasnost RORO TE pristupa može dodatno poboljšati ukoliko se optimizaciona funkcija koja minimizuje MLU proširi tako da minimizuje i ukupnu „cijenu“ rutiranja, tj. ukoliko na vrijednost optimizacione funkcije utiče stanje svih mrežnih linkova, a ne samo onih koji su u posmatranom trenutku najopterećeniji.

Razvijen je prototip predloženog SDN kontrolnog okruženja sa TE algoritmima koji su se tokom simulacione analize pokazali najefikasnijim po više kriterijuma, od kojih su ključni: servisni kapacitet, kontrolni *overhead* i računaska kompleksnost. Implementacija je izvršena nadogradnjom *open-source* OpenFlow kontrolera. Eksperimentalna analiza potvrdila je zadovoljavajuću skalabilnost SDN kontrolne ravni i mogućnost pravovremene reakcije na iznenadne saobraćajne distorzije.

Kvalitet i originalnost razvijenih TE tehnika su potvrđeni kroz publikovanje radova u referentnim naučnim časopisima.

### 3. Konačna ocjena disertacije

Doktorska disertacija kandidatkinje mr Slavice Tomović sadrži niz originalnih i značajnih rezultata, a ujedno predstavlja skladnu cjelinu, korektno jezički i stilski oblikovanu, i tehnički obrađenu u skladu sa savremenim zahtjevima izrade publikacije u oblasti naučno-istraživačkog rada. U izradi doktorske disertacije kandidatkinja je pokazala visok stepen poznavanja naučne osnove problematike. Takođe, kandidatkinja je jasno i precizno postavila ciljeve i primijenila adekvatne metode istraživanja polazeći od postojećih rešenja i referentne literature. Sve dobijene rezultate je veoma detaljno i kritički analizirala.

Sagledavanjem mnogobrojnih i veoma vrijednih rezultata datih u disertaciji, zaključuje se da su očekivanja i postavljeni ciljevi iz Prijave doktorske teze ispunjeni.

Predložena TE rješenja imaju značajne prednosti u odnosu na do sada poznate pristupe. Rešenja su prilagođena zahtjevima mreža naredne generacije, koje će karakterisati softverski definisana arhitektura sa centralizovanom kontrolnom ravni. U disertaciji je predložen model SDN kontrolnog okruženja koji se može iskoristiti za pružanje fleksibilnog BoD servisa, odnosno dinamičku alokaciju i skaliranje virtuelnih linkova za ultra-pouzdanu komunikaciju sa malim kašnjenjem. U disertaciji je detaljno analiziran uticaj TE algoritama na stabilnost mreže i brzinu odziva na zahtjev korisnika. Praktična izvodljivost predloženih TE pristupa sa postojećim tehnologijama i protokolima potvrđena je razvojem odgovarajućeg prototipa SDN kontrolera i eksperimentalnom analizom.

Cjelokupno izlaganje u disertaciji sadrži potrebne detalje koji su neophodni za eventualnu reprodukciju svih prezentovanih simulacionih i eksperimentalnih rezultata. Sva eventualna ograničenja i specifičnosti eksperimenata su eksplicitno naznačeni u njihovom opisu i/ili prezentaciji rezultata.

Disertacija otvara prostor za istraživanja u pravcu:

- prilagođavanja predloženih algoritama scenariju alokacije virtuelnih mrežnih topologija sa NFV servisnim lancima u 5G sistemima;
- razvoja adaptivnih TE mehanizama za dinamičko skaliranje virtuelnih linkova koji su sastavni dio jedne virtuelne mrežne topologije na osnovu predikcija sobračajne matrice;
- unapređenja algoritama za kontrolu pristupa primjenom mašinskog učenja;
- razvoja distribuirane verzije TE algoritama za hijerarhijsku SDN kontrolnu ravan.

#### Originalni naučni doprinos

U pogledu ostvarenog originalnog doprinosa disertacije, Komisija izdvaja sledeće:

- Predložen je originalni dizajn SDN kontrolnog okruženja kod kojeg je logika za upravljanje saobraćajem organizovana u *online* modul za rutiranje i *offline* modul za inženjering saobraćaja. Predloženi dizajn omogućava ISP provajderima pružanje fleksibilnog BoD servisa, koji podrazumijeva mogućnost dinamičkog prilagođavanja QoS parametara konekcija u skladu sa iznenadnim i privremenim potrebama korisnika.
- Matematički je formulisan problem inženjeringa saobraćaja sa QoS garancijama za saobraćajne tokove. Razmatrano je više QoS metrika koje su od velikog značaja za savremene Internet servise, uključujući: propusnost, kašnjenje i pouzdanost prenosa. Simulacionom analizom pokazano je da predloženi TE pristup doprinosi značajnom poboljšanju servisnog kapaciteta meže u odnosu CSPF-bazirana rešenja. Prednosti dinamičkog inženjeringa saobraćaja demonstrirane su i poređenjem sa *oblivious* tehnikom rutiranja, koja je optimizovana za *bose* model saobraćaja. Poboljšanja performansi evidentna su i kada se optimizacioni TE algoritam izvršava u dužim vremenskim intervalima. Samim tim mogu se očekivati zadovoljavajuće performanse i kada informacije o matrici saobraćaja nisu precizno poznate.
- Predloženi TE pristup podrazumijeva prisustvo SDN uređaja na periferiji mreže, dok u jezgru mreže koristi statičke tunele koje je moguće implementirati i tradicionalnim MPLS ruterima. Mogućnost integracije sa MPLS uređajima veoma je bitna iz ekonomske perspektive, jer tranzicija sa MPLS na SDN tehnologiju zahtijeva značajna ulaganja u infrastrukturu. U disertaciji je izvršeno poređenje predloženog pristupa sa dva kompleksnija rešenja koja koriste fleksibilnost SDN rutiranja i u jezgru mreže. Simulacionom analizom utvrđeno je da su gubici u pogledu servisnog kapaciteta relativno mali, dok se primjenom statičkih tunela značajno smanjuje kontrolni *overhead* i kompleksnost TE algoritma.
- Analizirani su negativni efekti dinamičkog inženjeringa saobraćaja na stabilnost mreže. Predložen je bi-kriterijumski TE optimizacioni model (RO-RO) koji teži simultano da minimizuje prosječno odstupanje šeme rutiranja od optimalne i učestanost ažuriranja tabela tokova. Predložen je i originalni pristup za izbor kompromisnog Pareto optimalnog rešenja za razmatrani optimizacioni problem. Predloženi pristup dinamički prioritizuje suprostavljene optimizacione funkcije, uzimajući u obzir broj rekonfiguracija koji je izvršen u prethodnim TE ciklusima, tako da posmatrano na dužem vremenskom intervalu učestanost rekonfiguracija rijetko prelazi kritičnu vrijednost koju definiše mežni operator. Kako je na ovaj način broj rekonfiguracija prilikom svakog izvršavanja RO-RO algoritma

kontrolisan, SDN kontroler može vršiti inženjering saobraćaja relativno često, u cilju pravovremene reakcije na iznenadne saobraćajne distorzije i kvarove u mreži.

- Predložena je heuristika za RO-RO optimizacioni algoritam koja se može izvršavati u polinomijalnom vremenu. Presentovani rezultati simulacija potvrdili su da RO-RO heuristika doprinosi efikasnijem korišćenju mrežnih resursa od *state-of-the-art* konkurenskog rešenja iz literature. Poboljšanja su ostvarena i pored manje računске složenosti.
- U disertaciji je razmatrano više različitih definicija optimizacione funkcije za problem balansiranja saobraćajnog opterećenja. Pokazano je da uobičajeni pristup MLU minimizacije značajno zaostaje u pogledu performansi za pristupom koji razmatra iskorišćenost svih linkova u mreži.
- Razvijen je prototip predloženog SDN kontrolnog okruženja na OpenFlow kontroleru. U sklopu okruženja implementirano je više TE algoritama čija računска kompleksnost ispunjava uslove za primjenu u realnim sistemima. Eksperimenti u virtuelizovanom mrežnom okruženju potvrdili su zaključke simulacione analize.

Dio ostvarenih rezultata, koji predstavljaju originalni naučni doprinos disertacije, publikovan je u časopisima sa SCI liste (sedam radova, sa ukupnim impact faktorom 13.833). Pored toga, kandidatkinja je objavila veliki broj radova sa rezultatima iz teze u drugim relevantnim časopisima i na međunarodnim konferencijama.

#### Mišljenje i prijedlog komisije

Na osnovu svega izloženog, Komisija konstatuje da disertacija ispunjava sve zakonske, formalne i suštinske uslove, kao i sve kriterijume koji se primjenjuju prilikom vrednovanja doktorske disertacije. Komisija je mišljenja da doktorska disertacija mr Slavice Tomović predstavlja originalan i visoko-kvalitetan naučno-istraživački rad, da sadrži vrijedne naučne rezultate i efikasna rešenja koja se mogu primijeniti u realnim ISP mrežama, u cilju ispunjenja QoS zahtjeva za Internet servise naredne generacije. Imajući u vidu kvalitet i obim ostvarenih rezultata, Komisija sa zadovoljstvom predlaže Vijeću Elektrotehničkog fakulteta i Senatu Univerziteta Crne Gore da doktorsku disertaciju pod nazivom: „ Analiza performansi novih tehnika za inženjering saobraćaja u ISP mrežama naredne generacije “, kandidatkinje mr Slavice Tomović, prihvate i odobre njenu javnu usmenu odbranu.

#### Izdvojeno mišljenje

(popuniti ukoliko neki član komisije ima izdvojeno mišljenje)

Ime i prezime

#### Napomena

(popuniti po potrebi)

KOMISIJA ZA OCJENU DOKTORSKE DISERTACIJE	
Prof. dr. Milica Pejanović-Đurišić, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore, Podgorica, Crna Gora.	
Prof. dr. Igor Radusinović, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet Crne Gore, Podgorica, Crna Gora.	
Prof. dr. Zoran Čiča, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija.	
Datum i ovjera (pečat i potpis odgovorne osobe)	
U Podgorici, <u>12.09.2019.</u>	
	DEKAN 

Crna Gora UNIVERZITET CRNE GORE ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET			
Prijava	Datum	Prilog	Vrijednost
02/1	21.06.2019	982	

## VIJEĆU ELEKTROTEHNIČKOG FAKULTETA

I

### SENATU UNIVERZITETA CRNE GORE

#### **Predmet: Ocjena doktorske disertacije kandidatkinje mr Slavice Tomović**

Senat Univerziteta Crne Gore, na sjednici održanoj 04.06.2019. godine, prihvatio je predlog Vijeća Elektrotehničkog fakulteta br. 02/1-773 od 28.05.2019. godine i Odlukom broj 03-1613/2 od 04.06.2019. god. imenovao nas je za članove Komisije za ocjenu doktorske disertacije pod nazivom: „Analiza performansi novih tehnika za inženjering saobraćaja u ISP mrežama naredne generacije“, kandidatkinje Slavice Tomović, magistra tehničkih nauka. Nakon detaljnog proučavanja priložene doktorske disertacije, podnosimo sljedeći:

### IZVJEŠTAJ

#### 1. PREGLED DISERTACIJE

Doktorska disertacija pod nazivom: „Analiza performansi novih tehnika za inženjering saobraćaja u ISP mrežama naredne generacije“, kandidatkinje mr Slavice Tomović sadrži 163 stranice A4 formata. Sastoji se od uvoda, 6 poglavlja, zaključka, spiska literature sa 132 citirane bibliografske jedinice i priloga. Disertacija sadrži 54 slike i 12 tabela.

U disertaciji je analiziran problem inženjeringa saobraćaja (*Traffic Engineering – TE*) u softverski-definisanim mrežama (*Software Defined Networks - SDN*) Internet Servis Provajdera (ISP). Predloženo je više originalnih TE algoritama koji se mogu iskoristiti za unapređenje BoD (*Bandwidth on Demand*) servisa. Predloženi algoritmi omogućavaju pouzdan prenos podataka uz garanciju kašnjenja i propusnosti. Pri tome, obrada korisničkih zahtjeva vrši se u realnom vremenu, a prisutvo SDN uređaja zahtijeva se samo na ivici mreže. Doprinosa u odnosu na postojeća istraživanja u TE oblasti predstavlja i analiza kompromisa između optimalnosti šeme rutiranja i učestanosti rekonfiguracija. Dobijeni rezultati pokazuju da predložena rešenja ostvaruju

značajna poboljšanja u odnosu na konvencionalne TE tehnike i *state-of-the-art* tehnike koje su bazirane na višekriterijumskoj optimizaciji. Najefikasnija od predloženih rešenja implementirana su na OpenFlow kontroleru i eksperimentalno verifikovana.

U **Uvodu** disertacije su istaknuti ključni izazovi sa kojima se suočavaju ISP provajderi uslijed sve strožijih QoS (*Quality of Service*) zahtjeva savremenih Internet aplikacija. Dat je pregled postojećih tehnika za garanciju kvaliteta servisa i inženjering saobraćaja, i istaknute su njihove prednosti i nedostaci. Objasnjeno je koncept softverski definisanog umrežavanja (SDN), na kojem će biti bazirane mreže naredne generacije, kao i mogućnosti koje SDN nudi za inženjering saobraćaja i virtualizaciju mreže. Rezimirana su *state-of-the-art* SDN TE rešenja, koja su dominantno dizajnirana za DC (*Data Center*) i inter-DC mreže, i objašnjeno je zbog čega ova rešenja ne mogu ispuniti ključne zahtjeve ISP provajdera. Pored toga, jasno su definisani ciljevi disertacije.

U **prvoj glavi** („**Izazovi u razvoju ISP mreža naredne generacije**”) objašnjeni su trendovi i pravci razvoja mreža naredne generacije, kao i ograničenja koja predstavljaju značajan izazov prilikom njihovog dizajniranja i implementacije. Dat je pregled novih servisnih scenarija koji su motivisali 5G inicijativu. Takođe, predstavljeni su QoS zahtjevi koje 5G mreže treba da ispune. Zatim, objašnjen je trend mrežne softverizacije, kao i uloga SDN i NFV (*Network Function Virtualization*) tehnologija u 5G sistemima. Detaljno su analizirane karakteristike OpenFlow protokola, koji je iskorišćen za realizaciju TE rešenja predloženih u tezi. Na kraju poglavlja diskutovane su mogućnosti SDN-a za unapređenje i proširenje servisnog portfolia ISP provajdera.

U **drugoj glavi** („**Upravljanje saobraćajem**”) dat je pregled TE rešenja iz literature koja su dizajnirana za tradicionalne MPLS (*MultiProtocol Label Switching*) i IP (*Internet Protocol*) mreže. Rešenja su klasifikovana po kriterijumu dinamike izvršavanja na *online* i *offline*. Posebno su istaknuti nedostaci ovih rešenja koje je moguće prevazići SDN mrežnom arhitekturom. Takođe, predstavljeni su različiti saobraćajni modeli koji se koriste prilikom definisanja optimizacionih TE problema. Za svaki od analiziranih saobraćajnih modela formulisan je problem minimizacije maksimalne iskorišćenosti linkova (*Maximum Link Utilization* - MLU), koji ima veliki praktični značaj u ISP mrežama. Presentovani su i različiti pristupi rešavanju višekriterijumskih TE problema.

U trećoj glavi („Tehnike za garanciju kvaliteta servisa”) razmatrane su tehnike za pružanje QoS garancija na nivou mreže. Objasnjene su dvije ključne QoS arhitekture koje je standardizovao IETF (*Internet Engineering Task Force*): IntServ i DiffServ, a zatim su identifikovane dodatne QoS mogućnosti koje nudi OpenFlow protokol u SDN mrežama. Izvršena je klasifikacija osnovnih QoS problema rutiranja i diskutovana je njihova računaska kompleksnost.

U četvrtoj glavi („Predlog kontrolnog okruženja za inženjering saobraćaja u SD-ISP mrežama”) predstavljen je originalni dizajn SDN kontrolera, kod kojeg je u cilju poboljšanja skalabilnosti logika za kontrolu saobraćaja organizovana u dva modula: (i) modul za *online* rutiranje i kontrolu pristupa, i (ii) *offline TE* modul, koji periodično optimizuje težinske faktore za balansiranje saobraćaja. Predstavljen je matematički model *offline TE* algoritma, koji optimizacionu funkciju bazira na minimizaciji MLU, a kao optimizaciona ograničenja koristi zahtjeve saobraćajnih tokova u pogledu propusnosti, kašnjenja i pouzdanosti. Predloženo rešenje je upoređeno sa konvencionalnim i *state-of-the-art* rešenjima slične namjene u pogledu procenta odbijenih QoS zahtjeva, prosječne MLU vrijednosti i generisanog kontrolnog *overhead*-a. Algoritmi su upoređeni po više kriterijumima i pri različitim parametrima sistema, kako bi se izveli što potpuniji zaključci o njihovim performansama i ponašanju u različitim uslovima implementacije.

U petoj glavi („Predlog TE rešenja sa kontrolisanim rekonfiguracijama: RO-RO”) identifikovani su problemi koji nastaju kao rezultat rekonfiguracija mreže za potrebe inženjeringa saobraćaja. Predložen je bi-kriterijumski TE optimizacioni model koji teži simultano da minimizuje „troškove” rutiranja i učestanost rekonfiguracija. Pri tome, za razliku od konkurentskog rešenja iz literature, polazna pretpostavka je da statistički model mrežnih događaja nije unaprijed poznat. Predloženo rešenje nije bazirano na klasičnom rešavanju bi-kriterijumskog optimizacionog problema, gdje se kompromisno rešenje iz Pareto seta bira statičkim težiranjem vrijednosti optimizacionih funkcija. Težiranje optimizacionih funkcija vrši se na osnovu ograničenja u pogledu srednje dozvoljene učestanosti rekonfiguracija, koje zadaje mrežni operator. Ovo ograničenje modelovano je virtuelnim baferom koji se vremenom popunjava kada srednja učestanost rekonfiguracija pređe kritičnu vrijednost. Za izbor najefikasnijeg

Pareto optimalnog rešenja primijenjen je Lyapunov *drift-plus-penalty* algoritam, koji teži da minimizuje zauzetost virtuelnog bafera i „troškove“ rutiranja. Na ovaj način, praćenjem zauzetosti virtuelnog bafera, indirektno je ostvareno dinamičko težiranje primarnih optimizacionih funkcija. S obzirom da analizirani bi-kriterijumski optimizacioni problem pripada klasi *NP-complete* problema, predložena je i heuristika koja omogućava efikasno rešavanje velikih problemskih instanci.

Predložena TE rešenja koja su se po više kriterijuma pokazala pogodnim za praktičnu primjenu, implementirana su na OpenFlow/SDN kontroleru. Detalji implementacije i rezultati eksperimentalne evaluacije dati su u **šestoj glavi** („**Eksperimentalni rezultati**“).

U **Zaključku** su date završne konstatacije i zapažanja sa osvrtom na realizovano istraživanje, njegov značaj, kao i mogućnosti rada na budućim istraživanjima u ovom pravcu.

## **2. VREDNOVANJE DISERTACIJE**

### **2.1. Problem**

Usled ekspanzije *Internet of Things* (IoT) sistema u automobilske industriji, zdravstvu i energetici, kao i sve veće popularnosti aplikacija proširene i virtuelne stvarnosti, garancija ultra-pouzdanе komunikacije sa malim kašnjenjem postaje ključni izazov u ISP mrežama. Kako bi održali korak za pomenutim trendovima i pružili adekvatan kvalitet servisa u uslovima velikog saobraćajnog opterećenja, ISP provajderi primjenjuju visok stepen redundanse u svojim mrežama. Naime, u okosnici mreže koriste se linkovi 2-3 puta većeg kapaciteta u odnosu na njihovo prosječno opterećenje. S obzirom da ovakav pristup nije ekonomski održiv, istraživačka zajednica ulaže velike napore u razvoj naprednih tehnika za inženjering saobraćaja (TE).

TE tehnike su od krucijalne važnosti za provajdere Internet servisa jer omogućavaju optimizaciju mrežnih performansi, efikasno korišćenje mrežnih resursa i smanjenje operativnih troškova. Podrška za inženjering saobraćaja uvedena je još u ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) i IP/MPLS mrežama. Međutim, pokazalo se da ove



tehnologije i odgovarajuće TE tehnike ne mogu ispuniti zahtjeve mreža naredne generacije, iz dva razloga. Prvo, savremene Internet aplikacije zahtijevaju da kontrolna ravan mreže donosi i sprovodi kontrolne odluke u skoro realnom vremenu, i da bude dovoljno skalabilna da se izbori sa ogromnom količinom saobraćaja. Mrežna arhitektura bi trebalo da bude u stanju da klasifikuje saobraćaj različitih aplikacija, i da pruži odgovarajući tip servisa svakoj od klasa u kratkom vremenskom periodu (npr. reda milisekundi). Drugo, današnjim mrežama su neophodni inteligentniji efikasniji alati za balansiranje saobraćajnog opterećenja kako bi odgovorile na izazove koje nameću rapidan razvoj Cloud tehnologija i *Internet of Things* servisa. Međutim, konvencionalne TE tehnologije bazirane su na zatvorenom i nefleksibilnom dizajnu mrežne arhitekture, gdje su kontrolna ravan i ravan podataka integrisane na svakom uređaju. Distribuirana kontrolna ravan onemogućava dinamičku analizu i regulaciju stanja u mreži, uslijed čega mreža nije u stanju da se prilagodi rastućim i veoma varijabilnim obascima saobraćaja.

Softverski-definisano umrežavanje (SDN) predstavlja novi model mrežne arhitekture kod koje je kontrolna ravan razdvojena od ravni podataka i logički centralizovana na kontrolerskom uređaju. SDN kontroler predstavlja pogodnu platformu za implementaciju sofisticiranih TE algoritama u formi centralizovanih aplikacija koje imaju globalni uvid u stanje mreže i mogu dinamički mijenjati mrežnu konfiguraciju u cilju poboljšanja sveukupnih performansi. Potencijal SDN mrežne arhitekture za poboljšanje iskorišćenosti mrežnih resursa već je uspješno demonstriran u DC, inter-DC i kampus mrežama. Međutim, primjena SDN-a u ISP mrežama počela je da privlači pažnju tek nedavno, i za sada predstavlja nedovoljno istraženu oblast u kojoj se očekuju novi naučno-istraživački doprinosi. Specifičnost problema inženjeringa saobraćaja u ISP mrežama ogleda se u tome što nije moguće kontrolisati dolazne saobraćajne tokove na način koji je uobičajen u DC i inter-DC mrežama. Naime, u DC i inter-DC mrežama moguće je dinamički kontrolisati brzinu generisanja saobraćaja i planirati vremenski raspored saobraćajnih tokova kada je to potrebno. Na ovaj način moguće je izbjeći iznenadne fluktuacije saobraćaja i spriječiti zagušenje mrežnih linkova. Sa druge strane, ISP mreže nemaju ovu privilegiju jer klijentima moraju pružiti QoS garancije specificirane u SLA (*Service Level Agreement*) ugovorima. U literaturi je predloženo

više TE tehnika koje teže da minimizuju vjerovatnoću blokiranja QoS zahtjeva. Međutim, predložena rešenja dominantno su dizajnirana za klasični BoD servis, čiji je fokus na garanciji propusnosti. Sa druge strane, garancija kašnjenja i pouzdanosti je nedovoljno istražena, uprkos značaju koji ima za veliki broj aplikacija.

U uobičajenoj klasifikaciji TE algoritma ističu se dvije komplementarne forme: *online* i *offline*. Osnovna razlika između *offline* i *online* TE tehnika je (ne)dostupnost saobraćajne matrice i vremenski okvir manipulacije saobraćajem. *Offline* TE rešenja periodično vrše optimalno mapiranje prognoziranе matrice saobraćaja na fizičku topologiju. Optimizacija mrežne konfiguracije vrši se u dužim vremenskim okvirima, tipično jednom dnevno, nedeljno ili mjesečno. Glavna slabost ovog pristupa je što nije moguće adaptirati konfiguraciju mreže dinamici saobraćaja i događajima kao što su ispadi linkova i rutera. *Online* TE tehnike dinamički kontrolišu mrežu ne zahtijevajući informacije o očekivanoj matrici saobraćaja. Osnovni zadatak *online* algoritama je optimalno balansiranje opterećenja linkova prilikom rutiranja novih saobraćajnih tokova (jedan po jedan) tako da mreža može zadovoljiti proizvoljnu buduću saobraćajnu potražnju bez ulaska u zagušenje. U nekim slučajevima, *online* TE algoritmi vrše rerutiranje postojećih tokova u mreži u cilju ispunjenja QoS zahtjeva novih tokova. Međutim, rerutiranje je obično ograničeno na mali broj tokova kako se ne bi ugrozila mrežna stabilnost i kvalitet servisa. S obzirom da kompletni saobraćajni uslovi nisu poznati, *online* TE rešenja ne mogu obezbijediti optimalnu konfiguraciju ruta.

Iako SDN nudi nove mogućnosti za efikasno upravljanje saobraćajem, u većim mrežama centralizovana kontrolna ravan nameće brojne izazove u pogledu skalabilnosti. Da bi obezbijedio optimalan rad mreže, SDN kontroler mora da reaguje na promjene saobraćaja i događaje u mreži u realnom vremenu. Ovo zahtijeva rešavanje TE optimizacionih problema u uskim vremenskim okvirima i rekonfiguraciju tabela tokova SDN uređaja na osnovu rezultata optimizacije. Međutim, česte rekonfiguracije negativno se odražavaju na kvalitet servisa jer kontroler mora da ukloni stare rute i uspostavi nove, rizikujući privremena zagušenja linkova i kreiranje petlji rutiranja. Uobičajeni pristup rešavanju ovog problema je periodično izvršavanje TE algoritma u dovoljno velikim vremenskim razmacima. Tako, na primjer, u komercijalnim ISP

mrežama TE algoritam se obično izvršava u intervalima od jednog sata ili više. Manja učestanost optimizacija znači veću pouzdanost i stabilnost mreže, ali mreža koristi neoptimalnu konfiguraciju duže vremena, što može biti kritično kada se uslovi u mreži mijenjaju nepredvidljivo. U novijoj literaturi predloženo je nekoliko sofisticiranijih pristupa. Međutim, predložna rešenja su ili bazirana na pretpostavci da su karakteristike stohastičkih procesa koji odgovaraju različitim događajima u mreži (dolasci i odlasci tokova, kvarovi) unaprijed poznate, što je u praksi teško očekivati, ili na kompleksnim optimizacionim modelima koji nisu pogodni za praktičnu primjenu.

## 2.2. Ciljevi i hipoteze disertacije

Osnovna hipoteza doktorske disertacije je da se primjenom SDN TE rešenja može poboljšati servisni kapacitet ISP mreža. Problem neskalabilnosti SDN kontrolne ravni moguće je prevazići balansiranjem opterećenja preko proaktivno instaliranih tunela u ravni podataka i adekvatnim kombinovanjem *offline* TE mehanizama i *online* algoritama rutiranja. Pri tome, poželjna strategija je da *offline* TE algoritmi periodično optimizuju mrežnu konfiguraciju na kontrolisan način, i da pružaju potrebne smjernice *online* algoritmima rutiranja tako da odabrane rute ne stvaraju „interferenciju” budućim saobraćajnim zahtjevima.

U skladu sa hipotezom definisani su ciljevi doktorske disertacije:

- Utvrditi prednosti i nedostatke *state-of-the-art* TE tehnika;
- Utvrditi set zahtjeva ISP provajdera koje je neophodno uzeti u obzir u optimizacionom modelu za inženjering saobraćaja u ISP mrežama;
- Matematički formulirati problem inženjeringa saobraćaja u ISP mrežama pod ograničenjima u pogledu propusnosti, kašnjenja i pouzdanosti za svaki od uspostavljenih virtuelnih linkova;
- Predložiti TE rešenja koja koriste prednosti SDN-a na ivici mreže, pri čemu konvencionalna MPLS oprema može biti korišćena u jezgru mreže;
- Analizirati kompromis između efikasnosti inženjeringa saobraćaja i prosječne učestanosti rekonfiguracija; Matematički formulirati bi-kriterijumski optimizacioni problem koji minimizuje „troškove” rutiranja i broj rekonfiguracija.

- Predložiti TE heuristiku prihvatljive računske kompleksnosti u skladu sa definisanim optimizacionim kriterijumima.
- Implementirati predložena TE rešenja na OpenFlow kontroleru.

### **2.3. Bitne metode koje su primijenjene u disertaciji**

U skladu sa temom disertacije, predmetom istraživanja i postavljenim ciljevima, u toku izrade doktorske disertacije performanse različitih algoritama za inženjering saobraćaja upoređene su metodama simulacione i emulacione analize. Tokom polaznih istraživanja razvijen je originalni simulator u Python programskom jeziku. Simulacije i eksperimenti su rađeni za PoP (*Point of Presence*) model realne ISP mreže koja je izložena velikom saobraćajnom opterećenju. Prosječna vrijednost matrice saobraćaja generisana je u skladu sa *gravity* modelom. Dinamički dolasci saobraćajnih tokova modelovani su Poasonovim dolaznim procesima, čije prosječno trajanje ima eksponencijalnu raspodjelu. Parametri Poasonove i eksponencijalne raspodjele birani su u skladu sa maksimalnim intenzitetom saobraćaja koji mreža može da podrži. Predložene tehnike za inženjering saobraćaja, koje su ključni doprinos istraživanja, oslanjaju se na algoritme mješovitog cjelobrojnog linearnog programiranja.

### **2.4. Rezultati disertacije i njihovo tumačenje sa zaključcima**

Prvi proklamovani zadatak doktorske disertacije, a ujedno i njen prvi važan doprinos, je detaljna analiza literature iz oblasti inženjeringa saobraćaja. Na osnovu identifikovanih nedostataka postojećih TE rešenja za ISP mreže, razvijeno je više novih rešenja koje se oslanjaju na mogućnosti SDN tehnologije. Dok su radovi u ovoj oblasti dominantno fokusirani na optimizaciju iskorišćenosti resursa ISP mreže, zanemarujući aspekt kvaliteta servisa, kandidatkinja je istraživanja prilagodila zahtjevima mreža narednih generacija, gdje je garancija performansi jedan od ključnih zahtjeva. Razmatrane su tri metrike kvaliteta servisa: propusnost, kašnjenje i pouzdanost.

U disertaciji je predloženo originalno SDN kontrolno okruženje za ISP mreže, za koje je karakteristična organizacija logike za upravljanje saobraćajem u *online* i *offline* modul. *Online* modul nudi interfejs prema krajnjim korisnicima, prihvata njihove BoD (*Bandwidth on Demand*) zahtjeve, sprovodi kontrolu pristupa na osnovu trenutne

dostupnosti resursa u mreži, i instalira nove rute ukoliko je to potrebno. Sve navedene operacije izvršavaju se u skoro realnom vremenu. Optimizacija iskorišćenosti mrežnih resursa delegirana je *offline* modulu, koji periodično vrši inženjering saobraćaja uzimajući u obzir QoS ograničenja u pogledu propusnosti, kašnjenja i pouzdanosti, za svaki pojedinačni korisnički zahtjev. Na ovaj način djelimično je „žrtvovana“ optimalnost rutiranja u cilju smanjenja vremena odziva na BoD zahtjev. Istraživanja kandidatkinje orijentisana su ka unapređenju servisnog portfolia ISP provajdera, koji je danas dominantno ograničen na dugoročno iznajmljivanje privatnih linija (virtuelnih linkova) sa rezervisanim kapacitetom. Predloženi dizajn SDN kontrolera podržava fleksibilni BoD servis, koji omogućava korisnicima da dinamički skaliraju QoS parametre svojih konekcija u skladu sa trenutnim potrebama, na potpuno automatizovan način.

Za predloženi dizajn SDN kontrolera razvijeno je više TE algoritama, razmatrajući različite kriterijume za optimizaciju mrežnih performansi. Najprije, u disertaciji je predstavljen SDN-LB algoritam, koji optimizacionu funkciju bazira na minimizaciji maksimalne iskorišćenosti linkova (MLU – *Maximum Link Utilization*), a kao optimizaciona ograničenja koristi zahtjeve saobraćajnih tokova u pogledu propusnosti, kašnjenja i robustnosti na otkaze linkova. Odgovarajući optimizacioni model, koji se karakteriše velikom računskom kompleksnošću, uprošćen je tako da može biti riješen u polinomijalnom vremenu. Performanse predloženog TE pristupa upoređene su sa CSPF (*Constrained Shortest Path First*) pristupom, koji je dominantno zastupljen u današnjim MPLS mrežama, *oblivious* TE pristupom baziranim na *hose* saobraćajnom modelu, i TE rešenjima koja koriste pogodnosti fleksibilnog SDN rutiranja u jezgru mreže. Simulacioni rezultati pokazali su da predloženo rešenje pruža bolje performanse od klasičnog CSPF i *oblivious* TE pristupa čak i kada se *offline* TE modul izvršava periodično, u dužim vremenskim intervalima. Dobijeni rezultati takođe pokazuju da pri odgovarajućoj učestanosti TE optimizacija predloženi pristup ostvaruje servisni kapacitet relativno blizak onom koji se postiže u mrežama sa SDN jezgrom. Pri tome, značajno smanjuje kontrolni *overhead*.

Posebna pažnja posvećena je analizi uticaja dinamičkog inženjeringa saobraćaja na stabilnost mreže. Predložen je novi TE algoritam (*Routing Optimality - Reconfiguration*

*Overhead balance* - RORO) koji minimizuje dvije konfliktne optimizacione funkcije: MLU i broj rekonfiguracija. RO-RO algoritam vrši dinamičku prioritizaciju razmatranih optimizacionih funkcija primjenom Lyapunov *drift-plus-penalty* algoritma prilikom izbora rešenja iz Pareto fronta. Kao ulazni parametar algoritmu se zadaje ograničenje u pogledu prosječne učestanosti rekonfiguracija. RO-RO dopušta veći broj rekonfiguracija od kritične vrijednosti u slučaju kada šema rutiranja značajno odstupa od optimalne. Međutim, posmatrano na dužem vremenskom intervalu, rekonfiguracije su pažljivo kontrolisane tako da njihov broj nikada značajnije ne prelazi vrijednost koju preferira mrežni operator. S obzirom da je RO-RO optimizacioni problem *NP-complete*, predložena je i heuristika koja omogućava efikasno rešavanje problemskih instanci u ISP mrežama kompleksnih topologija. Dobijeni simulacioni rezultati su pokazali da predložena heuristika, sa manjom računskom kompleksnošću, ostvaruje bolje performanse od *state-of-the-art* konkurentskih TE rešenja iz literature, a pri tome ne zahtijeva poznavanje karakteristika stohastičkih procesa koji odgovaraju različitim događajima u mreži (odlasci i dolasci saobraćajnih tokova, ispadi linkova itd.). U disertaciji je takođe pokazano da se efikasnost RORO TE pristupa može dodatno poboljšati ukoliko se optimizaciona funkcija koja minimizuje MLU proširi tako da minimizuje i ukupnu „cijenu“ rutiranja, tj. ukoliko na vrijednost optimizacione funkcije utiče stanje svih mrežnih linkova, a ne samo onih koji su u posmatranom trenutku najopterećeniji.

Razvijen je prototip predloženog SDN kontrolnog okruženja sa TE algoritmima koji su se tokom simulacione analize pokazali najefikasnijim po više kriterijuma, od kojih su ključni: servisni kapacitet, kontrolni *overhead* i računaska kompleksnost. Implementacija je izvršena nadogradnjom *open-source* OpenFlow kontrolera. Eksperimentalna analiza potvrdila je zadovoljavajuću skalabilnost SDN kontrolne ravni i mogućnost pravovremene reakcije na iznenadne saobraćajne distorzije.

Kvalitet i originalnost razvijenih TE tehnika su potvrđeni kroz publikovanje radova u referentnim naučnim časopisima i prezentovanje radova na vodećim naučnim konferencijama iz ove oblasti.

### 3. KONAČNA OCJENA DISERTACIJE

Doktorska disertacija kandidatkinje mr Slavice Tomović sadrži niz originalnih i značajnih rezultata, a ujedno predstavlja skladnu cjelinu, korektno jezički i stilski oblikovanu i tehnički obrađenu u skladu sa savremenim zahtjevima izrade publikacije u oblasti naučno-istraživačkog rada.

U izradi doktorske disertacije kandidatkinja je pokazala visok stepen poznavanja naučne osnove problematike. Takođe, kandidatkinja je jasno i precizno postavila ciljeve i primijenila adekvatne metode istraživanja polazeći od postojećih rješenja i referentne literature. Sve dobijene rezultate je veoma detaljno i kritički analizirala.

Sagledavanjem mnogobrojnih i veoma vrijednih rezultata datih u disertaciji, zaključuje se da su očekivanja i postavljeni ciljevi iz *Prijave doktorske teze* ispunjeni.

Predložena TE rješenja imaju značajne prednosti u odnosu na do sada poznate pristupe. Rešenja su prilagođena zahtjevima mreža naredne generacije, koje će karakterisati softverski definisana arhitektura sa centralizovanom kontrolnom ravni. U disertaciji je predložen model SDN kontrolnog okruženja koji se može iskoristiti za pružanje fleksibilnog BoD servisa, odnosno dinamičku alokaciju i skaliranje virtuelnih linkova za ultra-pouzdanu komunikaciju sa malim kašnjenjem. U disertaciji je detaljno analiziran uticaj TE algoritama na stabilnost mreže i brzinu odziva na zahtjev korisnika. Praktična izvodljivost predloženih TE pristupa sa postojećim tehnologijama i protokolima potvrđena je razvojem prototipa SDN kontrolera i eksperimentalnom analizom.

Cjelokupno izlaganje u disertaciji sadrži potrebne detalje koji su neophodni za eventualnu reprodukciju svih prezentovanih simulacionih i eksperimentalnih rezultata. Sva eventualna ograničenja i specifičnosti eksperimenata su eksplicitno naznačeni u njihovom opisu i/ili prezentaciji rezultata.

Disertacija otvara prostor za istraživanja u pravcu:

- prilagođavanja predloženih algoritama scenariju alokacije virtuelnih mrežnih topologija sa NFV servisnim lancima u 5G sistemima;

- razvoja adaptivnih TE mehanizama za dinamičko skaliranje virtuelnih linkova koji su sastavni dio jedne virtuelne mrežne topologije na osnovu predikcija sobračajne matrice;
- unapređenja algoritama za kontrolu pristupa primjenom mašinskog učenja;
- razvoja distribuirane verzije TE algoritama za hijerarhijsku SDN kontrolnu ravan.

#### 4. ORIGINALNI NAUČNI DOPRINOS

U pogledu ostvarenog originalnog doprinosa disertacije, Komisija izdvaja:

- Predložen je originalni dizajn SDN kontrolnog okruženja kod kojeg je logika za upravljanje saobraćajem organizovana u *online* modul za rutiranje i *offline* modul za inženjering saobraćaja. Predloženi dizajn omogućava ISP provajderima pružanje fleksibilnog BoD servisa, koji podrazumijeva mogućnost dinamičkog prilagođavanja QoS parametara konekcija u skladu sa iznenadnim i privremenim potrebama korisnika.
- Matematički je formulisan problem inženjeringa saobraćaja sa QoS garancijama za saobraćajne tokove. Razmatrano je više QoS metrika koje su od velikog značaja za savremene Internet servise, uključujući: propusnost, kašnjenje i pouzdanost prenosa. Simulacionom analizom pokazano je da predloženi TE pristup doprinosi značajnom poboljšanju servisnog kapaciteta mreže u odnosu CSPF-bazirana rešenja. Prednosti dinamičkog inženjeringa saobraćaja demonstrirane su i poređenjem sa *oblivious* tehnikom rutiranja, koja je optimizovana za *hose* model saobraćaja. Poboljšanja performansi evidentna su i kada se optimizacioni TE algoritam izvršava u dužim vremenskim intervalima. Samim tim mogu se očekivati zadovoljavajuće performanse i kada informacije o matrici saobraćaja nisu precizno poznate.
- Predloženi TE pristup podrazumijeva prisustvo SDN uređaja na periferiji mreže, dok u jezgru mreže koristi statičke tunele koje je moguće implementirati i tradicionalnim MPLS ruterima. Mogućnost integracije sa MPLS uređajima veoma je bitna iz ekonomske perspektive, jer tranzicija sa MPLS na SDN tehnologiju zahtijeva značajna ulaganja u infrastrukturu. U disertaciji je izvršeno poređenje predloženog pristupa sa dva kompleksnija rešenja koja koriste fleksibilnost SDN



rutiranja i u jezgru mreže. Simulacionom analizom utvrđeno je da su gubici u pogledu servisnog kapaciteta relativno mali, dok se primjenom statičkih tunela značajno smanjuje kontrolni *overhead* i kompleksnost TE algoritma.

- Analizirani su negativni efekti dinamičkog inženjeringa saobraćaja na stabilnost mreže. Predložen je bi-kriterijumski TE optimizacioni model (RO-RO) koji teži simultano da minimizuje prosječno odstupanje šeme rutiranja od optimalne i učestanost ažuriranja tabela tokova. Predložen je i originalni pristup za izbor kompromisnog Pareto optimalnog rešenja za razmatrani optimizacioni problem. Predloženi pristup dinamički prioritizuje suprostavljene optimizacione funkcije, uzimajući u obzir broj rekonfiguracija koji je izvršen u prethodnim TE ciklusima, tako da posmatrano na dužem vremenskom intervalu učestanost rekonfiguracija rijetko prelazi kritičnu vrijednost koju definiše mežni operator. Kako je na ovaj način broj rekonfiguracija prilikom svakog izvršavanja RO-RO algoritma kontrolisan, SDN kontroler može vršiti inženjering saobraćaja relativno često, u cilju pravovremene reakcije na iznenadne saobraćajne distorzije i kvarove.
- Predložena je heuristika za RORO optimizacioni algoritam koja se može izvršavati u polinomijalnom vremenu. Presentovani rezultati simulacija potvrdili su da RO-RO heuristika doprinosi efikasnijem korišćenju mrežnih resursa *od state-of-the-art* konkurenskog rešenja iz literature. Poboljšanja su ostvorena i pored manje računске složenosti.
- U disertaciji je razmatrano više različitih definicija optimizacione funkcije za problem balansiranja saobraćajnog opterećenja. Pokazano je da uobičajeni pristup MLU minimizacije značajno zaostaje u pogledu performansi za pristupom koji razmatra iskorišćenost svih linkova u mreži.
- Razvijen je prototip predloženog SDN kontrolnog okruženja na OpenFlow kontroleru. U sklopu okruženja implementirano je više TE algoritama čija računska kompleksnost ispunjava uslove za primjenu u realnim sistemima. Eksperimenti u virtuelizovanom mrežnom okruženju potvrdili su zaključke simulacione analize.

Dio ostvarenih rezultata, koji predstavljaju originalni naučni doprinos disertacije, publikovan je u časopisima sa SCI liste (sedam radova, sa ukupnim *impact* faktorom

13.833). Pored toga, kandidatkinja je objavila veliki broj radova sa rezultatima iz teze u drugim relevantnim časopisima i na međunarodnim konferencijama.

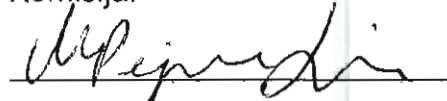
## 5. MIŠLJENJE I PREDLOG KOMISIJE

Na osnovu izloženog, Komisija konstatuje da disertacija ispunjava sve zakonske, formalne i suštinske uslove, kao i sve kriterijume koji se primjenjuju prilikom vrednovanja doktorske disertacije. Komisija je mišljenja da doktorska disertacija mr Slavice Tomović predstavlja originalan i visoko-kvalitetan naučno-istraživački rad, da sadrži vrijedne naučne rezultate i efikasna rešenja koja se mogu primijeniti u realnim ISP mrežama, u cilju ispunjenja QoS zahtjeva za Internet servise naredne generacije.

Imajući u vidu kvalitet i obim ostvarenih rezultata, Komisija sa zadovoljstvom predlaže Vijeću Elektrotehničkog fakulteta i Senatu Univerziteta Crne Gore da doktorsku disertaciju pod nazivom: „ Analiza performansi novih tehnika za inženjering saobraćaja u ISP mrežama naredne generacije“, kandidatkinje mr Slavice Tomović, prihvate i odobre njenu javnu usmenu odbranu.

Podgorica, 20.06.2019 god.

Komisija:



dr Milica Pejanović-Đurišić, redovni profesor

Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički fakultet



dr Igor Radusinović, redovni profesor

Univerzitet Crne Gore, Elektrotehnički fakultet



dr Zoran Čiča, vanredni profesor

Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

## Зоран Чича

### Биографија

Зоран Чича је рођен 18.03.1979. у Загребу. Основно образовање је започео у Загребу. У Сремској Митровици је завршио основну школу, а потом уписао и завршио гимназију. Након тога, 1997. године је уписао Електротехнички факултет у Београду као редован студент и дипломирао 27.05.2002. са укупном средњом оценом 9.50, на дипломском испиту оцена 10. Током студија хонорарно радио као демонстратор у Лабораторији за електронику Електротехничког факултета у Београду. Постдипломске студије - смер Телекомуникационе и рачунарске мреже на Електротехничком факултету у Београду је уписао 2002. Испите на постдипломским студијама положио је са просечном оценом 10. Магистарску тезу „Примена детерминистичке теорије сервисних система у планирању транспортних мрежа“, чији је ментор био редовни професор др Гроздан Петровић, одбранио је децембра 2007. године. Докторску дисертацију „Имплементација функција пакетског процесирања у Интернет рутерима великог капацитета“, чији је ментор била ванредни професор др Александра Смиљанић, одбранио је 12.07.2012. године.

У 2002. стекао је звање асистента-приправника на Електротехничком факултету у Београду. У 2008. је стекао звање асистента. У 2013. је стекао тренутно звање доцента. Држао је рачунске и лаб вежбе из више предмета на Електротехничком факултету у Београду: Телекомуникационе мреже, Пројектовање дигиталних телефонских централа, Рачунарске телекомуникације, Рачунарске основе и примена Интернета, Комутациони системи, Програмирање комуникационог хардвера, Интернет програмирање, Архитектура свичева и рутера. Такође је држао рачунске вежбе из предмета Рачунарске мреже и комуникације на Војно-техничкој академији. У звању доцента, држао је предавања из више предмета на Електротехничком факултету у Београду: Комутациони системи, Програмирање комуникационог хардвера, Мрежна администрација и програмирање, Телекомуникационе мреже за приступ, Широкопојасне телекомуникационе мреже, Теорија телекомуникационог саобраћаја, Синхронизација у телекомуникационим мрежама. Учествовао је на неколико пројеката финансираних од стране Министарства надлежног за науку у оквиру којих је био аутор/коаутор више техничких решења. Такође, Зоран Чича је био ментор више дипломских/завршних и мастер теза (више од 80 дипломских/завршних теза, више од 50 мастер теза), а био је и члан више комисија за дипломске/завршне и мастер тезе. Такође је био члан комисије за три докторске тезе, од којих је једна била двојна теза (Електронски факултет у Нишу и Norwegian University of Science and Technology у Трондхајму, Норвешка). Зоран учествује и у раду Комисије за студије II степена на Електротехничком факултету у Београду (као Председник комисије).

Зоран Чича је аутор више радова на домаћим и међународним конференцијама, као и часописима. Два рада су била награђена у категорији Најбољи радови младих аутора на конференцијама ЕТРАН 2007 и 2009. Четири рада су објављена у часописима са импакт фактором - 2 рада у IET Electronics Letters, 1 рад у Computer Networks и један рад у IEEE Computer Architecture Letters. Аутор је једног уџбеника (за предмет Програмирање комуникационог хардвера) који се користи у склопу наставе на Електротехничком факултету у Београду.

Зоран Чича је рецензент за међународне часописе IEEE Communication Letters, IEEE Transactions on Communications, Computer Networks, Wireless Personal Communications, Computer Communications, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, за међународну конференцију IEEE Workshop on High Performance Switching and Routing, TELFOR и

icETTRAN, као и за домаћу конференцију ETRAN. У 2010. добио је признање *Exemplary reviewer* за часопис IEEE Communication Letters.

## ДЕСЕТ РЕФЕРЕНЦИ

- [1] Z. Čiča, A. Smiljanić, „Balanced Parallelised Frugal IPv6 Lookup Algorithm,“ *IET Electronics Letters*, vol.47(17), pp. 963-965, August 2011, IF=0.965, ISSN 0013-5194, DOI: 10.1049/el.2011.0966, **M23**  
Линк на рад: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6004738>  
SCI листа:  
[http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Word=\\*Electronics%20Letters](http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Word=*Electronics%20Letters)
- [2] A. Smiljanić, Z. Čiča, „A Comparative Review of Scalable Lookup Algorithms for IPv6,“ *Computer Networks*, vol.56(13), pp. 3040-3054, September 2012, IF=1.200, ISSN 1389-1286, DOI: 10.1016/j.comnet.2012.04.027, **M22**  
Link na rad: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1389128612001806>  
SCI листа:  
[http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Word=\\*Computer%20networks](http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Word=*Computer%20networks)
- [3] Z. Čiča, „Non-blocking Frame Based Multicast Scheduler for IQ Switches,“ *IET Electronics Letters*, vol.52(4), pp. 285-287, February 2016, IF=1.155, ISSN 0013-5194, DOI: 10.1049/el.2015.3547, **M23**  
Линк на рад: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7405391>  
SCI листа:  
[http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Word=\\*Electronics%20Letters](http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Word=*Electronics%20Letters)
- [4] S. Durkovic, Z. Čiča, „Birkhoff-von Neumann Switch Based on Greedy Scheduling,“ *IEEE Computer Architecture Letters*, vol.PP(99), pp. 1-1, May 2017, IF=1.397, ISSN 1556-6056, DOI: 10.1109/LCA.2017.2707082, **M22**  
Линк на рад: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7932455>  
SCI листа:  
[http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Word=\\*IEEE%20Computer%20Architecture%20Letters](http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Word=*IEEE%20Computer%20Architecture%20Letters)
- [5] Z. Čiča, „IP Lookup as a Critical Functionality of Packet Processors,“ *Telfor Journal*, vol. 5(1), pp. 8-13, 2013, ISSN 1821-3251, **M52**  
SCOPUS: <http://journal.telfor.rs/Public/Home.aspx>  
Линк на рад: [http://journal.telfor.rs/Published/Vol5No1/Vol5No1\\_A2.pdf](http://journal.telfor.rs/Published/Vol5No1/Vol5No1_A2.pdf)
- [6] S. Durkovic, Z. Čiča, „Birkhoff-von Neumann Switch with Deflection Based Load Balancing,“ *Telfor Journal*, vol. 9(1), pp. 14-19, 2017, ISSN 1821-3251, DOI: 10.5937/telfor1701014D, **M52**  
SCOPUS: <http://journal.telfor.rs/Public/Home.aspx>  
Линк на рад: [http://journal.telfor.rs/Published/Vol9No1/Vol9No1\\_A3.pdf](http://journal.telfor.rs/Published/Vol9No1/Vol9No1_A3.pdf)
- [7] M. Carević, Z. Čiča, „FPGA Implementation of IP Packet Segmentation and Reassembly in Internet Router,“ *Serbian Journal of Electrical Engineering*, vol. 6(3), pp. 399-407, December 2009, ISSN 1451-4869, DOI: 10.2298/sjee0903399c **M52**  
Линк на рад: [http://www.journal.ftn.kg.ac.rs/Vol\\_6-3/03-Carevic-Cica.pdf](http://www.journal.ftn.kg.ac.rs/Vol_6-3/03-Carevic-Cica.pdf)  
SCOPUS: <http://www.journal.ftn.kg.ac.rs/>

- [8] Z. Čiča, A. Smiljanić, „Frugal IP Lookup Based on a Parallel Search,“ *Proc. of IEEE Workshop on High Performance Switching and Routing 2009*, Paris, France, June 2009, ISBN 978-1-4244-5174-6, DOI: 10.1109/HPSR.2009.5307435, **M33**
- [9] Z. Čiča, L. Milinković, A. Smiljanić, „FPGA Implementation of Lookup Algorithms,“ *Proc. of IEEE Workshop on High Performance Switching and Routing 2011*, Cartagena, Spain, July 2011, ISBN 978-1-4244-8454-6, DOI: 10.1109/HPSR.2011.5986037, **M33**
- [10] V. Soskic, A. Smiljanić, Z. Čiča, „Implementation of the multicast LDP protocol on the FPGA chips,“ *Proc. of IEEE Workshop on High Performance Switching and Routing 2014*, Vancouver, Canada, July 2014, ISBN 978-1-4799-1633-7, DOI: 10.1109/HPSR.2014.6900897, **M33**



УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ  
БЕОГРАД  
ПРИЈЕМАНО 28 FEB 2018  
0545/9

Студентски трг 1, 11000 Београд, Република Србија  
Тел.: 011 3207400; Факс: 011 2638912; E-mail: officebu@rect.bg.ac.rs

ВЕЋЕ НАУЧНИХ ОБЛАСТИ  
ТЕХНИЧКИХ НАУКА

Београд, 26.2.2018. године  
02 број: 61202-869/2-18  
ЛД

На основу чл. 145. Закона о високом образовању ("Службени гласник РС", број: 88/17), чл. 47. ст. 5. тач. 1. Статута Универзитета у Београду ("Гласник Универзитета у Београду", број 186/15-пречишћени текст и 189/16), чл. 13. ст. 1. Правилника о већима научних области на Универзитету у Београду ("Гласник Универзитета у Београду", број 134/07, 150/09, 158/11, 164/11, 165/11, 180/14, 195/16 и 197/17), чл. 21. ст. 1. тач. 1. Правилника о начину и поступку стицања звања и заснивања радног односа наставника Универзитета у Београду ("Гласник Универзитета у Београду", број 142/08, 150/09, 160/11 и 196/16) и Правилника о минималним условима за стицање звања наставника на Универзитету у Београду ("Гласник Универзитета у Београду", број 192/16, 195/16, 197/17 и 199/17), а на предлог Изборног већа Електротехничког факултета, број: 2515/7 од 13. фебруара 2018. године, Веће научних области техничких наука, на седници, одржаној 26. фебруара 2018. године, донело је

ОДЛУКУ

БИРА СЕ др Зоран Чича, у звање ванредног професора за ужу научну област Телекомуникације.

Образложење

Универзитет у Београду – Електротехнички факултет је дана 20. децембра 2017. године у публикацији „Послови“, објавно конкурс за избор у звање ванредног професора, за ужу научну област: Телекомуникације, због истека изборног периода.

Извештај Комисије за припрему извештаја о пријављеним кандидатима стављен је на увид јавности дана 15. јануара 2018. године, на сајту Факултета.

На основу предлога Комисије за припрему извештаја о пријављеним кандидатима, Изборно веће Електротехничког факултета, на седници одржаној 13. фебруара 2018. године, донело је одлуку о утврђивању предлога да се кандидат др Зоран Чича, изабере у звање ванредног професора.

Факултет је дана 19. фебруара 2018. године доставио Универзитету комплетан захтев за избор у звање на прописаним обрасцима.

Универзитет је комплетну документацију коју је доставио Факултет ставио на web страницу Универзитета, дана 19. фебруара 2018. године.

Веће научних области техничких наука, на седници одржаној дана 26. фебруара 2018. године, разматрало је захтев Факултета и утврдило да кандидат испуњава услове прописане чл. 74. и 75. Закона о високом образовању и чланом 125. Статута Универзитета у Београду, као и услове прописане Правилником о минималним условима за стицање звања наставника на Универзитету у Београду, па је донета одлука као у изреци.

ПРЕДСЕДНИК ВЕЋА

Проф. др Јован Филиповић

Доставити:

- Факултету (2),
- Архиви Универзитета (1).

**Prof.dr Igor Radusinović**

## **BIOGRAFIJA**

Igor Radusinović je rođen 29.07.1972. godine na Cetinju. U Podgorici je završio osnovnu i srednju školu. Nakon završetka srednje škole, 1990. godine, upisao je Elektrotehnički fakultet u Podgorici, gdje je u roku diplomirao jula 1994. godine sa prosječnom ocjenom 9,54.

Tokom obrazovanja više puta je nagrađivan, pri čemu je posebno važno napomenuti: diplome LUČA za osnovnu i srednju školu, NOVČANU NAGRADU UNIVERZITETA CRNE GORE koja se dodjeljuje najboljem studentu završne godine Elektrotehničkog fakulteta u Podgorici i PLAKETU UNIVERZITETA CRNE GORE kao najboljem studentu generacije u oblastima tehničkih i prirodnomatematičkih nauka.

Magistarske studije – oblast Telekomunikacije (Telekomunikacione mreže) na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu, je sa prosječnom ocjenom 10 (deset) završio 1997. godine odbranom magistarske teze. Na Elektrotehničkom fakultetu u Beogradu je 2003. godine odbranio doktorsku disertaciju pod nazivom "ANALIZA PERFORMANSI ATM KOMUTATORA SA STANOVIŠTA LOKACIJE I UPRAVLJANJA REDOVIMA ČEKANJA".

Od 01.12.1994. godine radi kao saradnik na Katedri za telekomunikacije Elektrotehničkog fakulteta u Podgorici. Biran je u zvanje asistenta za predmete Telekomunikacione mreže i Komutacioni sistemi na Katedri za telekomunikacije Elektrotehničkog fakulteta u Podgorici. U periodu od 2003. do 2008. godine je obavljao poslove docenta na predmetima Telekomunikacione mreže, Komutacioni sistemi i Računarske mreže na Katedri za telekomunikacije Elektrotehničkog fakulteta u Podgorici. Od 2008. godine do 2013. godine, je bio u zvanju vanrednog profesora na predmetima Telekomunikacione mreže, Komutacioni sistemi i Računarske mreže na Elektrotehničkom fakultetu u Podgorici. Od 2013. godine je u zvanju redovnog profesora na predmetima Telekomunikacione mreže, Komutacioni sistemi i Računarske mreže na Elektrotehničkom fakultetu u Podgorici. Tokom svog dosadašnjeg profesionalnog angažmana na Elektrotehničkom fakultet obavljao je više značajnih funkcija od kojih su najznačajnije: šef Katedre za telekomunikacije, rukovodilac Računarskog Centra, rukovodilac studijskog programa Elektronika, Telekomunikacije i Računari, predstavnik rukovodstva za kvalitet i rukovodilac Laboratorije za mjerenje elektromagnetnih emisija.

U dosadašnjem naučnom radu objavio je preko 150 radova u renomiranim međunarodnim i domaćim naučnim časopisima, kao i na međunarodnim i domaćim konferencijama. Oblasti naučnog istraživanja su telekomunikacione mreže sa posebnim rezultatima u teoriji redova čekanja, komutaciji paketa, tehnikama kontrole zagušenja i softverski definisanim mrežama. Do sada je bio mentor pri izradi dvije doktorske disertacije, dvanaest magistarskih teza i preko 80 diplomskih i specijalističkih radova. Igor Radusinović je rukovodio ili učestvovao u izradi sedamnaest domaćih i šest međunarodnih naučnih i stručnih projekata. Učestvovao je u izradi preko 50 elaborata o uticaju zračenja baznih stanica na životnu sredinu. Učestvovao je u mjerenjima i izradi Izvještaja o ispitivanju nivoa električnog polja za preko 100 radio emisionih sistema.

Član je profesionalnih udruženja IEEE, IEICE, Inžinjerske komore Crne Gore i Društva za telekomunikacije. Član je Naučnog odbora TELFOR-a, Programskog odbora INFOFEST-a i Programskog odbora IT. Recenzent je eminentnih međunarodnih časopisa IEEE Communications Letters i IEEE/ACM Transactions on Networking.

Od oktobra 2009. do februara 2011. godine je obavljao funkciju pomoćnika ministra za nauku, istraživanja i tehnološki razvoj u Ministarstvu prosvjete i nauke Vlade Crne Gore. Od marta 2011. do februara 2013. godine je obavljao dužnost predsjednika nacionalnog Savjeta za naučnoistraživačku djelatnost. Od početka 2010. godine do februara 2013. je bio predstavnik Crne Gore u ERAC (European Research Area Committee) i Bordu guvernera JRC (Joint Research Center Board of Governors). Od jula 2012. do avgusta 2016. godine je bio član Upravnog odbora Univerziteta Crne Gore. Od decembra 2011. godine je član, a od juna 2013. do jula 2017. godine i predsjednik Odbora direktora Pošte Crne Gore a.d. Podgorica. Od 2016. do aprila 2019. godine je bio senator Univerziteta Crne Gore. Govori engleski jezik. Oženjen je i ima tri sina.



## DESET REFERENCI

1. S. Tomović and I. Radusinović, "RO-RO: Routing Optimality - Reconfiguration Overhead Balance in Software-Defined ISP Networks," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 37, no. 5, pp. 997-1011, May 2019, Print ISSN: 0733-8716, DOI: 10.1109/JSAC.2019.2906762.  
Link na rad: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8672627>  
SCI lista: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=49>
2. S. Tomović and I. Radusinović, "An effective use of SDN for virtual-link provisioning in ISP networks," in *IEICE Transactions on Communications*, Vol.E102-B, No.4, pp.855-864, April 2019, ISSN: 0916-8516, DOI: 10.1587/transcom.2018EBP3191-  
Link na rad: [https://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e102-b\\_4\\_855&category=-&lang=E&year=2019&abst=](https://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e102-b_4_855&category=-&lang=E&year=2019&abst=)  
SCI lista: <http://www.ieice.org/cs/jpn/EB/index.html>
3. S. Tomović and I. Radusinović, "Mapping Application Requirements to Virtualization-Enabled Software Defined WSN," *Wireless Personal Communications*, Vol. 97, Issue 2, November 2017, pp. 1693-1709, ISSN: 0929-6212.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11277-017-4650-0>  
Link na rad: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11277-017-4650-0>  
SCI lista: <https://link.springer.com/journal/11277>
4. S. Tomović, K. Yoshigoe, I. Maljević, I. Radusinović, "Software-Defined Fog Network Architecture for IoT," *Wireless Personal Communications*, Vol. 92, No. 1, pp. 181-196, January 2017, ISSN: 0929-6212, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11277-016-3845-0>  
Link na rad: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11277-016-3845-0>  
SCI lista: <https://link.springer.com/journal/11277>
5. G. Gardašević, S. Divanović, M. Radonjić, I. Radusinović, "A qos-aware dual crosspoint queued switch with largest weighted occupancy first scheduling algorithm," *IEICE Transaction on Communications*, Vol.E98-B, No.01, January 2015, pp. 201-208, ISSN: 0916-8516 (print version), ISSN: 1745-1345 (Online), DOI: 10.1587/transcom.E98.B.201.  
Link na rad: [https://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e98-b\\_1\\_201&category=B&lang=E&year=2015&abst=](https://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e98-b_1_201&category=B&lang=E&year=2015&abst=)  
SCI lista: [http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Word=\\*IEICE%20Transactions%20on%20Communications](http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Word=*IEICE%20Transactions%20on%20Communications)
6. I. Radusinović, M. Radonjić, A. Šimurina, I. Maljević, Z. Veljovic, "A new analytical model for the cq switch throughput calculation under the bursty traffic", *International Journal of Electronics and Communications (AEU)*, Vol. 66, No 12, December 2012, pp.1038- 1041, ISSN: 1434-8411, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aeu.2012.05.009>  
Link na rad: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S143484111200129X>  
SCI lista: [http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Word=\\*AEU](http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Word=*AEU)
7. M. Radonjić, I. Radusinović, "Impact of scheduling algorithms on performance of crosspoint-queued switch", *Annals of Telecommunications*, Vol 66, No 5-6, May/June 2011, pp.363-376, ISSN: 0003-4347 (print version), ISSN: 1958-9395 (electronic version), DOI: 10.1007/s12243-010-0214-y.  
Link na rad: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12243-010-0214-y>  
SCI lista:

[http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Word=\\*Annals%20of%20Telecommunications](http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Word=*Annals%20of%20Telecommunications)

[http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&ISSN=\\*0003-4347](http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&ISSN=*0003-4347)

8. D. Banović, I. Radusinović, "Scheduling algorithm for VOQ switches," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, Vol. 62, Issue 6, Jun 2008., pp. 455-458, ISSN 1434-8411, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2007.06.004>.

Link na rad: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1434841107001288>

SCI lista:

[http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Word=\\*AEU](http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Word=*AEU)

9. I. Radusinović, M. Pejanović, Z. Petrović, "Performance of the dual-banyan atm switch under arbitrary traffic patterns," *European Transactions on Telecommunications (Transactions on Emerging Telecommunications Technologies)*, No. 14, pp 319 – 323, November 2003, DOI: <https://doi.org/10.1002/ett.927>, ISSN: 2161-3915.

Link na rad: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ett.927>

SCI lista:

[http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Word=\\*Transactions%20on%20Emerging%20Telecommunications%20Technologies](http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Word=*Transactions%20on%20Emerging%20Telecommunications%20Technologies)

10. I. Radusinović, M. Pejanović, Z. Petrović, "A new analytical model for the dual banyan switch throughput calculation," *IEEE Communications Letters*, Vol. 6., No. 2., pp 76-78, February 2002, ISSN: 1089-7798, DOI: [10.1109/4234.984701](https://doi.org/10.1109/4234.984701).

Link na rad: <https://ieeexplore.ieee.org/document/984701>

SCI lista:

[http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Word=\\*IEEE%20Communications%20Letters](http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Word=*IEEE%20Communications%20Letters)

**УНИВЕРЗИТЕТ ЦРНЕ ГОРЕ**

Ул. Цетинска бр. 2  
П. фак 99  
81000 ПОДГОРИЦА  
Ц Р Н А Г О Р А  
Телефон: (020) 414-255  
Факс: (020) 414-230  
E-mail: rektor@ac.me



**UNIVERSITY OF MONTENEGRO**

Ul. Cetinjska br. 2  
P.O. BOX 99  
81 000 PODGORICA  
MONTENEGRO  
Phone: (+382) 20 414-255  
Fax: (+382) 20 414-230  
E-mail: rektor@ac.me

Број: 08-2130  
Датум, 26.09.2013. г.

Ref: \_\_\_\_\_  
Date, \_\_\_\_\_

Na osnovu člana 75 stav 2 Zakona o visokom obrazovanju (Sl.list RCG, br. 60/03 i Sl.list CG, br. 45/10 i 47/11) i člana 18 stav 1 tačka 3 Statuta Univerziteta Crne Gore, Senat Univerziteta Crne Gore, na sjednici održanoj 26.09.2013. godine, donio je

## **ODLUKU O IZBORU U ZVANJE**

**Dr IGOR RADUSINOVIĆ** bira se u akademsko zvanje **redovni profesor** Univerziteta Crne Gore za predmete: Telekomunikacione mreže, Komutacioni sistemi, Računarske mreže (t) i Računarske mreže (r), na studijskom programu Elektronika, Telekomunikacije i Računari, na Elektrotehničkom fakultetu.



**REKTOR**

*Prof. dr Predrag Miranović*  
**Prof. dr Predrag Miranović**

УНИВЕРЗИТЕТ ЦРНЕ ГОРЕ  
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ

Бр. 02/2-1519  
Подгорица, 09.10. 2013 год.

**Проф. др Гордана Гардашевић**

**Биографија:**

Др Гордана Гардашевић, рођена 7.11.1970. год. у Бањој Луци, је ванредни професор на Електротехничком факултету Универзитета у Бањој Луци. Дипломирала је, магистрирала и докторирала на истом факултету, 1995., 2001. и 2008. год., респективно, у области телекомуникација. Истраживачке активности у току израде докторске тезе реализовала је на Националном техничком универзитету у Атини, Грчка, као стипендиста грчке владе (2007-2008). Постдокторске студије (2013-2014) завршила је на Универзитету у Болоњи, Италија. Изабрана је у звање доцента (2009) и звање ванредног професора (2015) на студијском програму Електроника и телекомуникације, за предмете на првом, другом и трећем циклусу студија (Телекомуникациони системи, Телекомуникационе мреже, Мултимедијалне телекомуникације, Радио-приступне технологије, Internet of Things технологије и апликације). Учествовала је у реализацији већег броја домаћих и међународних пројеката. Била је именована је од стране Министарства науке и технологије као представник у FP6 пројекту Европске уније за Босну и Херцеговину и члан владине групе за информационе технологије. Представник је БиХ у Horizon 2020 COST Action CA15104 - IRACON (Inclusive Radio Communication Networks for 5G and beyond). Обављала је функцију продекана за научноистраживачки рад. Тренутно обавља функцију шефа Катедре за телекомуникације на Електротехничком факултету у Бањој Луци. Координатор је трогодишњег пројекта (2018-2020) "Истраживање и развој рјешења за имплементацију Smart City концепта у граду Бања Лука", који представља стратешки пројекат за град Бања Лука. Истраживачке активности проф. Гардашевић обухватају област мобилних и бежичних телекомуникационих мрежа (архитектуре мрежа нове генерације, протоколи, квалитет услуга), сензорске мреже, Internet of Things протоколе и апликације. Аутор је два основна уџбеника, једне монографије, једног поглавља у међународној научној публикацији, те више од 70 научних и стручних радова из области истраживања. Члан је IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers), WSEAS (World Scientific and Engineering Academy and Society) и EURACON (European Association for Communications & Networking) удружења. Добитник је награде Универзитета за научноистраживачки рад.

**ЛИЧНЕ ИНФОРМАЦИЈЕ**

Име: Гордана

Презиме: Гардашевић

Адреса: Краља Петра I Карађорђевића 113, Бања Лука

Број телефона: 051/221 877

Електронска пошта: [gordana.gardasevic@etf.unibl.org](mailto:gordana.gardasevic@etf.unibl.org)

ЗВАЊЕ: Ванредни професор

НАУЧНА ОБЛАСТ: Телекомуникације

**ПРЕДМЕТИ**

**Академске студије трећег циклуса**

Internet of Things technologies and Applications

#### Академске студије другог циклуса

1010 Приступне мреже

1033 Радио-приступне технологије

1047 Бежичне сензорске мреже

1072 Дигиталне технологије за широкопојасни приступ

#### Академске студије првог циклуса

2248 Основи комуникација и теорија информација

2319 Телекомуникациони системи

2324 Телекомуникационе мреже

2329 Оптичке телекомуникације

2330 Бежичне сензорске мреже

2336 Мобилни радио системи

2337 Акустика и аудио техника

2340 Теорија информација са кодовањем

2348 Мултимедијалне телекомуникације

Ф502 Теорија информација

#### РАДНО ИСКУСТВО

2014 - , ванредни професор

2009-2014. год., доцент

2001-2009. год, виши асистент

1996-2001. год, асистент

#### ДЕСЕТ РЕФЕРЕНЦИ ИЗ БИБЛИОГРАФИЈЕ:

1. **G. Gardašević, M. Veletić, N. Maletić, D. Vasiljević, I. Radusinović, S. Tomović, M. Radonjić**, The IoT Architectural Framework, Design Issues and Application Domains, WIRELESS PERSONAL COMMUNICATIONS, January 2017, Volume 92, Issue 1, pp 127–148, ISSN:1572-834X, doi: 10.1007/s11277-016-3842-3.

Линк на рад: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11277-016-3842-3>

SCI листа:

[http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Word=\\*WIRELESS%20PERSONAL%20COMMUNICATIONS](http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Word=*WIRELESS%20PERSONAL%20COMMUNICATIONS)

2. C. Buratti, A. Stajkic, **G. Gardašević**, S. Milardo, D. Abrignani, S. Mijovic, G. Morabito, R. Verdone, Testing Protocols for the Internet of Things on the EuWIn Platform, IEEE Internet of Things JOURNAL, Vol. 3, No. 1, pp. 124 - 133, Feb, 2016, doi: 10.1109/JIOT.2015.2462030, Electronic ISSN: 2327-4662, **IMPACT FACTOR** = 7,6.

Линк на рад: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7172291>

SCI листа:

[http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Word=\\*IEEE%20internet%20of%20things%20journal](http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Word=*IEEE%20internet%20of%20things%20journal)

3. **G. Gardasevic**, S. Divanovic, M. Radonjic, I. Radusinovic, A QoS-aware Dual Crosspoint Queued Switch with Largest Weighted Occupancy First Scheduling Algorithm, IEICE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS, Vol. E98-B, No. 01, pp. 01 - 08, Jan, 2015, ISSN: 0916-8516 (print version), ISSN: 1745-1345 (Online), DOI: 10.1587/transcom.E98.B.201.

Линк на рад:

[https://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e98-b\\_1\\_201&category=B&lang=E&year=2015&abst=](https://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e98-b_1_201&category=B&lang=E&year=2015&abst=)

SCI листа:

[http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Word=\\*IEICE%20Transactions%20on%20Communications](http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Word=*IEICE%20Transactions%20on%20Communications)

4. **G. Gardašević**, D. Stjepanovic, A. Damljanovic, D. Cvijanovic, A Novel Algorithm for SOA-based Cross-Layer QoS Support in Multiservice Heterogeneous Environments, WSEAS TRANSACTIONS on INFORMATION SCIENCE and APPLICATIONS, Vol. 10, No. 3, pp. 69 - 78, Mar, 2013, E-ISSN: 2224-3402.

Линк на рад: <http://www.wseas.org/multimedia/journals/information/2013/015702-197.pdf>

5. **G. Gardašević**, M. Jevtic, P. Constantinou, Optimization of Application QoS Protocols for 3G/4G Mobile Networks, WSEAS TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS, Vol. 7, No. 9, pp. 984 - 993, Sep, 2008, ISSN: 1109-2742.

Линк на рад:

<https://pdfs.semanticscholar.org/9200/a6bfd0cfa821d3f73379947ceedbfe0b2d88.pdf>

6. Milovanovic, V. Pantovic, **G. Gardasevic**, Converging Technologies for the IoT: Standardization Activities and Frameworks, in Emerging Trends and Applications of the Internet of Things, Chapter 3, IGI Global, Hershey, Pennsylvania (USA), ISSN: 2327-3305; eISSN: 2327-3313, 2017.

7. **Gordana Gardasevic**, Predrag Plavsic and Dragan Vasiljevic: "Experimental IoT Testbed for Testing the 6TiSCH and RPL Coexistence", IEEE INFOCOM 2019, IEEE International Conference on Computer Communications, CNERT Workshop: Computer and Networking Experimental Research using Testbeds, 29 April - 2 May 2019, Paris, France.

8. **G. Gardašević**, D. Vasiljević, C. Buratti and R. Verdone, "Experimental Characterization of Joint Scheduling and Routing Algorithm Over 6TiSCH," 2018 European Conference on Networks and Communications (EuCNC), Ljubljana, Slovenia, 2018, pp. 424-428. doi: 10.1109/EuCNC.2018.8442481.

9. S. Milardo, **G. Gardasevic**, M. Abrignani, A. Stajkic, S. Mijovic, G. Morabito, C. Buratti, R. Verdone, Testing Protocols for the Internet of Things on the EuWin Platform, Proc. of the 23rd European Conference on Networks and Communications (EuCNC'2014), Bologna, Italy, Jun, 2014, DOI: 10.1109/JIOT.2015.2462030.

10. **G. Gardasevic**, D. Stjepanovic, A. Damljanovic and D. Cvijanovic, A SOA-based framework for cross-layer QoS adaptation in next generation networks, 30th IEEE International Performance Computing and Communications Conference, Orlando, FL, 2011, pp. 1-2. doi: 10.1109/PCCC.2011.6108096

Република Српска  
УНИВЕРЗИТЕТ У БАЊОЈ ЛУЦИ  
Сенат Универзитета

Број: 02/04-3.4730-68/14  
Дана, 25.12.2014. године

02.02.2015

61 01

На основу члана 77. и 94. Закона о високом образовању („Службени гласник Републике Српске“, број: 73/10, 104/11, 84/12 и 108/13) и члана 33. Статута Универзитета у Бањој Луци, Сенат Универзитета на 36. сједници од 25.12.2014. године доноси

**О Д Л У К У**

1. **Др Гордана Гардашевић** бира се у звање ванредног професора за ужу научну област Телекомуникације, на период од шест година.
2. Ова Одлука ступа на снагу даном доношења.

**Образложење**

Универзитет у Бањој Луци, на приједлог Наставно-научног вијећа Електротехничког факултета, расписао је дана 23.07.2014. године Конкурс за избор наставника за ужу научну област Телекомуникације.

На расписан Конкурс пријавио се један кандидат и то: др Гордана Гардашевић.

Наставно-научно вијеће Електротехничког факултета образовало је Комисију за писање извјештаја за избор наставника у одређено звање. Комисија је припремила писмени извјештај, предложила да се изврши избор као у диспозитиву ове Одлуке и исти доставила Наставно-научном вијећу Електротехничког факултета.

Наставно-научно вијеће Електротехничког факултета Универзитета у Бањој Луци на сједници одржаној 22.12.2014. године констатовало је да др Гордана Гардашевић испуњава у цјелости услове и утврдило приједлог, број: 20/3.1828-1846/14, да се др Гордана Гардашевић бира у звање ванредног професора за ужу научну област Телекомуникације, на период од шест година, и исти доставило Сенату Универзитета у Бањој Луци ради даљег поступка.

Сенат Универзитета је на 36. сједници одржаној 25.12.2014. године утврдио да је приједлог из претходног става у складу са одредбама Закона о високом образовању, те је сагласно члану 77. Закона о високом образовању одлучио као у диспозитиву ове Одлуке.

**ПРАВНА ПОУКА:** Против ове Одлуке може се поднијети захтјев за преиспитивање Сенату Универзитета у Бањој Луци у року од 15 дана од дана пријема исте.

Достављено:

1. Именованој,
2. Електротехничком факултету 2 х,
3. Служби за правне и кадровске послове,
4. а/а.

**ПРЕДСЈЕДАВАЈУЋИ СЕНАТА  
РЕКТОР**

Проф. др Станко Станић



**Prof. dr Vesna Popović-Bugarin**

## **BIOGRAFIJA**

Vesna Popović-Bugarin je rođena 03. 05. 1978. godine u Podgorici. Osnovnu i srednju školu (Gimnazija "Slobodan Škerović", prirodno-matematički smjer) završila je u Podgorici. U toku školovanja učestvovala je i osvajala nagrade na opštinskim i republičkim takmičenjima u znanju iz fizike. Diplomirala je, magistrirala i doktorirala 2001, 2005. i 2009. godine, respektivno, na Elektrotehničkom fakultetu (ETF) u Podgorici.

Elektrotehnički fakultet u Podgorici je upisala 1996. godine na odsjeku Elektronika, gdje je i diplomirala 2001. godine, odbranivši diplomski rad pod nazivom "**Primjena vremensko-frekvencijske analize signala u neonatologiji**".

Postdiplomske studije, smjer Računari, upisala je školske 2002. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Podgorici. Magistrirala je 30. 06. 2005. godine, odbranivši magistarsku tezu pod nazivom "**Spektralna analiza nestacionarnih signala metodama sa visokom rezolucijom**". Tokom postdiplomskih studija boravila je u Ženevi, Švajcarska, na institutu za nuklearna istraživanja – CERN (European Organisation for Nuclear Research), u periodu od 08. 06. 2004. do 18. 07. 2004. godine.

Doktorsku disertaciju "**Vremensko-frekvencijska analiza u obradi radarskih signala**", pod mentorstvom prof. dr Ljubiše Stanković, odbranila je 29. 06. 2009. godine. Tokom doktorskih studija boravila je u: Brestu, Francuska, na ENSIETA-i (École Nationale Supérieure d'Ingénieurs), u periodu od 24. 05. 2006. do 24. 06. 2006., kao i u Bonu, Njemačka, na Univerzitetu primijenjenih nauka, Bonn-Rhein-Sieg University of Applied Sciences, u periodu od 02. 08. 2007. do 02. 09. 2007.

Član je profesionalnih udruženja: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), IEEE Signal Processing Society, Odbora za informaciono-komunikacione tehnologije pri CANU i Centra za mlade naučnike pri CANU.

Vesna Popović-Bugarin je zaposlena na ETF-u od 2002. godine, 27.05.2010. godine je izabrana u zvanju docenta, dok je 24.06.2015. izabrana u zvanje vanrednog profesora.

Oblasti njenog interesovanja uključuju vremensko-frekvencijsku analizu signala, obradu radarskih signala, analizu mikro-Doppler efekta u radarskim signalima i vještačku inteligenciju.

Vesna Popović-Bugarin je bila angažovana na velikom broju domaćih i međunarodnih naučnih projekata, kao i na dva FP7 projekta. Objavila je 35 naučnih radova, od čega 11 u međunarodnim časopisima sa SCI liste. Koautor je jednog domaćeg udžbenika i po jednog poglavlja u dvijema monografijama izdatim od strane inostranih izdavača.

Vesna Popović-Bugarin je obavljala funkciju zamjenika naučnog direktora BIO-ICT Centra izvrsnosti.

Više detalja i kompletan spisak referenci može se pronaći na sajtu [www.tfsa.ac.me](http://www.tfsa.ac.me).



## DESET REFERENCI

1. **V. Popović-Bugarin**, and S. Djukanović, "Efficient instantaneous frequency estimation in high noise based on the Wigner distribution," *Signal Processing*, vol. 157, pp. 25-29, April 2019 (ISSN: 0165-1684, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2018.11.008>)  
Link na rad:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165168418303682>  
SCI lista:  
[http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Full=\\*Signal%20Processing](http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Full=*Signal%20Processing)
2. S. Djukanović, and **V. Popović-Bugarin**, "Efficient and accurate detection and frequency estimation of multiple sinusoids," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 1118-1125, December 2018. (ISSN: 2169-3536, DOI: [10.1109/ACCESS.2018.2886397](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2886397))  
Link na rad:  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8573769>  
SCI lista:  
[http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Word=\\*IEEE%20Access](http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Word=*IEEE%20Access)
3. I. Djurović, **V. Popović-Bugarin**, and M. Simeunović, "The STFT-based estimator of micro-Doppler parameters," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 53, no. 3, 2017, pp. 1273-1283. (Print ISSN: 0018-9251, Electronic ISSN: 1557-9603 DOI: [10.1109/TAES.2017.2669741](https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2669741) )  
Link na rad:  
<https://ieeexplore.ieee.org/document/7857025>  
SCI lista:  
[http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Full=\\*IEEE%20Transactions%20on%20Aerospace%20and%20Electronic%20Systems](http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Full=*IEEE%20Transactions%20on%20Aerospace%20and%20Electronic%20Systems)
4. M. Brajović, **V. Popović-Bugarin**, I. Djurović, and S. Djukanović, "Post-processing of time-frequency representations in instantaneous frequency estimation based on ant colony optimization," *Signal Processing*, Vol. 138, September 2017, pp. 195–210, (ISSN: 0165-1684, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2017.03.022>)  
Link na rad:  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165168417301160>  
SCI lista:  
[http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Full=\\*Signal%20Processing](http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Full=*Signal%20Processing)
5. LJ. Stanković, M. Daković, T. Thayaparan, and **V. Popović-Bugarin**, "Inverse Radon Transform Based Micro-Doppler Analysis from a Reduced Set of Observations," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 51, No. 2, pp.1155-1169, April 2015 (Print ISSN: 0018-9251, Electronic ISSN: 1557-9603, DOI: [10.1109/TAES.2014.140098](https://doi.org/10.1109/TAES.2014.140098))  
Link na rad:  
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7126172>  
SCI lista:  
[http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Full=\\*IEEE%20Transactions%20on%20Aerospace%20and%20Electronic%20Systems](http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Full=*IEEE%20Transactions%20on%20Aerospace%20and%20Electronic%20Systems)

6. LJ. Stanković, **V. Popović-Bugarin**, and F. Radenović, "Genetic algorithm for rigid body reconstruction after micro-doppler removal in the radar imaging analysis," *Signal Processing*, Volume 93, Issue 2013, Jan 2013. (ISSN: 0165-1684, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2013.01.005>)  
Link na rad: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016516841300008X>  
SCI lista: [http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Full=\\*Signal%20Processing](http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Full=*Signal%20Processing)
7. LJ. Stanković, M. Daković, T. Thayaparan, and **V. Popović-Bugarin**, "Micro-Doppler Removal in the Radar Imaging Analysis," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 49, No. 2, April 2013, pp.1234-1250 (Print ISSN: 0018-9251, Electronic ISSN: 1557-9603, DOI: [10.1109/TAES.2013.6494410](https://doi.org/10.1109/TAES.2013.6494410))  
Link na rad: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6494410>  
SCI lista: [http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Full=\\*IEEE%20Transactions%20on%20Aerospace%20and%20Electronic%20Systems](http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Full=*IEEE%20Transactions%20on%20Aerospace%20and%20Electronic%20Systems)
8. S. Djukanović, and **V. Popović-Bugarin**, "A parametric method for multicomponent interference suppression in noise radars," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 48, no. 3, pp. 2730–2738, July 2012 (Print ISSN: 0018-9251, Electronic ISSN:1557-9603, DOI: [10.1109/TAES.2012.6237624](https://doi.org/10.1109/TAES.2012.6237624))  
Link na rad: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6237624>  
SCI lista: [http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Full=\\*IEEE%20Transactions%20on%20Aerospace%20and%20Electronic%20Systems](http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Full=*IEEE%20Transactions%20on%20Aerospace%20and%20Electronic%20Systems)
9. S. Djukanović, **V. Popović-Bugarin**, M. Daković, and LJ. Stanković, "A parametric method for non-stationary interference suppression in direct sequence spread-spectrum systems," *Signal Processing*, Vol. 91, No. 6, pp. 1425-1431, June 2011 (ISSN: 0165-1684, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2010.09.010>)  
Link na rad: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165168410003634>  
SCI lista: [http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Full=\\*Signal%20Processing](http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Full=*Signal%20Processing)
10. I. Djurović, C. Ioana, T. Thayaparan, LJ. Stanković, P Wang, **V. Popović-Bugarin**, and M. Simeunović, "Cubic-phase function evaluation for multicomponent signals with application to SAR imaging," *IET Signal Processing*, vol. 4, no. 4, August 2010, pp. 371-381 (Print ISSN: 1751-9675, Electronic ISSN: 1751-9683, DOI:[10.1049/iet-spr.2009.0065](https://doi.org/10.1049/iet-spr.2009.0065))  
Link na rad: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5547941>  
SCI lista: [http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Word=\\*IET%20Signal%20Processing](http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Word=*IET%20Signal%20Processing)

# УНИВЕРЗИТЕТ ЦРНЕ ГОРЕ

Ул. Цетинска бр. 2  
П. факс 99  
81000 ПОДГОРИЦА  
ЦРНА ГОРА  
Телефон: (020) 414-255  
Факс: (020) 414-230  
E-mail: rektor@uc.me



# UNIVERSITY OF MONTENEGRO

Ul. Cetinjska br. 2  
P.O. BOX 99  
81 000 PODGORICA  
MONTENEGRO  
Phone: (+382) 20 414-255  
Fax: (+382) 20 414-230  
E-mail: rektor@uc.me

Број: 08-1739  
Датум, 24. 06. 2015 г.

Ref: \_\_\_\_\_  
Date, \_\_\_\_\_

Na osnovu člana 72 stav 2 Zakona o visokom obrazovanju (Službeni list Crne Gore br. 44/14) i člana 32 stav 1 tačka 9 Statuta Univerziteta Crne Gore, Senat Univerziteta Crne Gore, na sjednici održanoj 24. juna 2015. godine, donio je

## ODLUKU O IZBORU U ZVANJE

Dr **VESNA POPOVIĆ-BUGARIN** bira se u akademsko zvanje **vanredni profesor Univerziteta Crne Gore** za predmete: Osnovi računarstva II na osnovnom akademskom studijskom programu Elektronika, telekomunikacije i računari, Baze podataka i Ekspertni sistemi na postdiplomskom specijalističkom akademskom studijskom programu Elektronika, telekomunikacije i računari, na **Elektrotehničkom fakultetu**, na period od pet godina.

REKTOR

Prof. Radmila Vojvodić

УНИВЕРЗИТЕТ ЦРНЕ ГОРЕ  
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ

Број: 02/1-1169  
Подносива, 29. 06. 2015 год.



## MIRKO SUŽNJEVIĆ

### BIOGRAFIJA

Mirko Sužnjević docent je na Zavodu za telekomunikacije, Fakultet elektrotehnike i računarstva Sveučilište u Zagrebu. Diplomirao je u rujnu 2006. na isto fakultetu na smjeru Telekomunikacije i informatika u režimu studija s naglaskom na znanstvenoistraživačkom radu. Doktorsku disertaciju pod nazivom „Modeliranje mrežnog prometa višekorisničkih igara s preuzimanjem uloga temeljeno na korisnikovom ponašanju“ (engl. „Modelling of Network Traffic for Multiplayer Role Playing Games Based on User Behaviour“) brani na Fakultetu elektrotehnike i računarstva Sveučilišta u Zagrebu u svibnju 2012. godine. Tijekom i nakon doktorskog studija pohađao je četiri doktorske škole koju su organizirali europski projekti suradnje (COST akcije) te europske mreže izvrsnosti.

Zaposlio se na FER-u na radnom mjestu zavodskog suradnika u Zavodu za telekomunikacije 2006. godine, a unaprijeđen je u istraživača asistenta 2008. godine. Njegovo istraživanje od 2006. godine financirano je iz niza istraživačkih projekata koji se odvijaju u suradnji FER-a s istraživačko-razvojnim odjelom tvrtke Ericsson Nikola Tesla: „Session-level Signalling for Advanced Multimedia“, „Future Advanced Multimedia Service Enablers“, „Session-level Signalling for Advanced Multimedia“, „e-Health Research“ i „Policy Based Resource Control for Complex IP Networks“. Bio je zaposlen je kao istraživač na projektu „ACROSS - Center of Research Excellence for Advanced Cooperative Systems“ (285939), u okviru sedmog okvirnog programa Europske Unije (FP7) (2011-2014), na projektu Information and communication technologies for generic and energy efficient communication solutions for application in e-/m-health (ICTGEN) (2014-2016) te na projektu „Cooperative QoE Management in Mobile Networks for Interactive Multimedia Cloud-based Services“ (Q-MANIC) kojeg financira Hrvatska zaklada za znanost (2016 -2018). Bio je i je zaposlen na projektu „Napredne metode i tehnologije u znanosti o podacima i kooperativnim sustavima“ (Datacross) financiranog iz Europskog fonda za regionalni razvoj (2018 -2019). Zapošljava se kao docent na Zavodu za telekomunikacije u veljači 2019. Sudjelovao je na znanstvenom projektu Ministarstva znanosti, obrazovanja i sporta Republike Hrvatske „Isporuka sadržaja i pokretljivost korisnika i usluga u mrežama nove generacije“ (036-0362027-1639), kao i nizu stručnih projekata s tvrtkom Ericsson Nikola Tesla: „Survey and analysis of monitoring solutions for YouTube network traffic and application layer KPIs“ (2015-2016), „QoE monitoring solutions for mobile OTT video streaming“ (QoMoVid) (2016 - ) i „Data driven 3D animation generation in Unity“ (DaDAGer) (2018). Sudjelovao je u bilateralnom projektu suradnje Slovenije i Hrvatske pod nazivom „Services and Applications in the Future Internet: Ensuring Quality and Energy Efficiency“ (2012-2013). Bio je uključen u rad COST akcije IC0703 TMA i COST akcije IC1003 Qualinet.

Objavio je jedanaest radova u časopisima (od kojih sedam u časopisima A kategorije) te dvadeset i sedam radova na međunarodnim konferencijama i radionicama. Autor je i dvaju radova objavljenih u stručnim časopisima te jednog poglavlja u knjizi. Bio je predsjedatelj međunarodne radionice „The 14th International Workshop on Network and Systems Support for Games“ održane u Zagrebu 2015 godine. Član je hrvatske sekcije IEEE te IEEE Communication Society. Suautor je dvaju nacрта u okviru Internet Engineering Task Forcea. Za sudjelovanje u radu 87. sastanka IETF-a u Berlinu (Njemačka) 2013. godine, primio je prestižnu stipendiju Internet Society Fellowship.

## DESET REFERENCI IZ BIBLIOTHEKE

1. Ivan Slivar, **Mirko Suznjevic**, and Lea Skorin-Kapov (2018), „Game Categorization for Deriving QoE-Driven Video Encoding Configuration Strategies for Cloud Gaming,” *ACM Trans. Multimedia Comput. Commun. Appl.*, Vol. 14, Issue 3s, Article S6 (June 2018), 24 pages. DOI: <https://doi.org/10.1145/3132041>, ISSN: 1551-6857 / 1551-6865.  
Link na rad: <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=3132041>  
SCI lista: [http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Word=\\*ACM%20Transactions%20on%20Multimedia](http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Word=*ACM%20Transactions%20on%20Multimedia)
2. Orsolich, I., Pevec, D., **Suznjevic, M.** et al, „A machine learning approach to classifying YouTube QoE based on encrypted network traffic,” *Multimedia Tools and Applications*, Vol. 76, Issue 21, pp 22267–2230, (2017), doi: <https://doi.org/10.1007/s11042-017-4728-4>, ISSN: 1380-7501.  
Link na rad: <https://link.springer.com/journal/11042>  
SCI lista: <https://www.letpub.com/index.php?page=journalapp&view=detail&journalid=6012&showlang=&currentcommentpage=2>
3. **Suznjevic, M.**, Skorin-Kapov, L., and Humar, I., (2015), „Statistical User Behavior Detection and QoE Evaluation for Thin Client Services. Computer Science and Information Systems,” Vol. 12, No. 2, pp. 587-605, doi: <https://doi.org/10.2298/CSIS140810018S>, ISSN: 1820-0214 (Print) 2406-1018 (Online).  
Link na rad: <http://www.comsis.org/archive.php?show=pprwc075-1409>  
SCI lista: <http://www.comsis.org>
4. Manzano, M., Urueña, M., **Suznjević, M.** et al., „Dissecting the protocol and network traffic of the OnLive cloud gaming platform” , *Multimedia Systems (2014)* , Vol. 20, Issue 5, pp. pp 451–470, doi: <https://doi.org/10.1007/s00530-014-0370-4>, ISSN: 0942-4962.  
Link na rad: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00530-014-0370-4>  
SCI lista: [http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Word=\\*Multimedia%20Systems](http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Word=*Multimedia%20Systems)
5. **Suznjevic, M.**, Stupar, I. & Matijasevic, M., „A model and software architecture for MMORPG traffic generation based on player behavior,” *Multimedia Systems (2013)*, Vol. 19, Issue 3, pp 231–253, DOI: <https://doi.org/10.1007/s00530-012-0269-x>, ISSN: 0942-4962.  
Link na rad: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00530-012-0269-x#citeas>  
SCI lista: [http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Word=\\*Multimedia%20Systems](http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Word=*Multimedia%20Systems)
6. **Suznjevic, M.** & Matijasevic, M., “Player behavior and traffic characterization for MMORPGs: a survey,” *Multimedia Systems (2013)*, Vol. 19, Issue 3, pp 199–220, DOI: <https://doi.org/10.1007/s00530-012-0270-4>, ISSN: 0942-4962.  
Link na rad: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00530-012-0270-4>  
SCI lista: [http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Word=\\*Multimedia%20Systems](http://mjl.clarivate.com/cgi-bin/jrnlst/jlresults.cgi?PC=MASTER&Word=*Multimedia%20Systems)

7. **Suznjevic, M.**, Dobrijevic, O. & Matijasevic, M., „MMORPG Player Actions: Network Performance, Session Patterns and Latency Requirements Analysis,” *Multimedia Tools and Applications* (2009), Vol 45, Issue 1–3, pp 191–214 191, DOI: <https://doi.org/10.1007/s11042-009-0300-1>, ISSN: 1380-7501.  
Link na rad: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11042-009-0300-1>  
  
SCI lista:  
<https://www.letpub.com/index.php?page=journalapp&view=detail&journalid=6012&showlang=&currentcommentpage=2>
8. **Suznjevic M.**, Skorin-Kapov L., Humar I. (2014), “User Behavior Detection Based on Statistical Traffic Analysis for Thin Client Services”, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Springer, Vol. 2, pp. 247-256, DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-05948-8\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-319-05948-8_24), Print ISBN: 978-3-319-05947-1.  
Link na rad: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-05948-8\\_24](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-05948-8_24)
9. **Mirko Suznjevic**, Jose Saldana, Maja Matijasevic, Julián Fernández-Navajas, and José Ruiz-Mas, “Analyzing the Effect of TCP and Server Population on Massively Multiplayer Games,” *International Journal of Computer Games Technology*, vol. 2014, Article ID 602403, 17 pages, 2014, DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/602403>.  
Link na rad: <https://www.hindawi.com/journals/ijcgt/2014/602403/>
10. Saldana J., **Suznjevic M.** (2015), “QoE and Latency Issues in Networked Games,” In *Handbook of Digital Games and Entertainment Technologies*, Springer, Singapore, DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-4560-52-8\\_23-1](https://doi.org/10.1007/978-981-4560-52-8_23-1), Online ISBN: 978-981-4560-52-8.  
Link na poglavlje knjige: [https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F978-981-4560-52-8\\_23-1](https://link.springer.com/referenceworkentry/10.1007%2F978-981-4560-52-8_23-1)



Sveučilište u Zagrebu  
VIJEĆE TEHNIČKOGA PODRUČJA

Na temelju članka 24. Statuta Sveučilišta u Zagrebu, na prijedlog Povjerenstva za utvrđivanje kriterija i potvrdu izbora u zvanja,

Vijeće tehničkoga područja potvrđuje da je

dr. sc.  
**MIRKO SUŽNJEVIĆ**

izabran  
u znanstveno-nastavno zvanje

*docenta*

u području: tehničkih znanosti,  
znanstveno polje: elektrotehnika  
na Fakultetu elektrotehnike i računarstva

Klasa: 640-03/19-05/09  
Zagreb, 4. veljače 2019.

PREDSJEDNIK VIJEĆA TEHNIČKOGA PODRUČJA

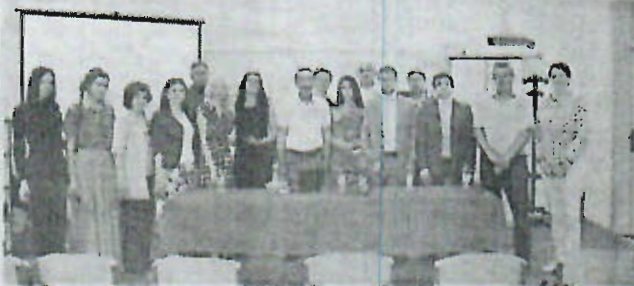


prof. dr. sc. Bruno Zelić

## НАГРАДА

**а** je 1999. и додјељује заслуге у области културно-осветитељства, књижевности и умјетности, за велику улогу у очувању културног наслеђа и за зближавање културнација.

**М.Н.**



Награда за поштовање

Iv.br.197/18  
A, u pravnoj stvari izvršnog povjerioca  
JZIKE CRNE GORE - "PAM CG", Pod-  
("DRINA» restoran), TRG SUNCA BR.2,  
v.s. 577,80 €, na osnovu vjerodostojne  
ju („Službeni list CG", broj 36/11, 28/14,

### BJAVLJIVANJEM

estoran, TRG SUNCA BR.2, Budva, PIB:  
navedeno, vrši se dostavljanje Rješenja o  
za izvršenje i priložima, a radi naplate duga  
svima od 01.07.2019 godine.Izvršni dužnik  
iti ovom izvršitelju, na adresi Tabaciņa bb-  
e na oglasnoj tabli nadležnog suda, a koja je  
ršni dužnik da se ovakav način dostavljanja  
stati ovakvim načinom dostavljanja snositi  
jednom u dnevnom listu "DAN" i na oglas-  
ni izvršenim nakon isteka roka od 8 (osam)  
oliko je prethodno izvršeno objavljivanje u

JAVNI IZVRŠITELJ  
Vladan VUJOVIĆ

sdorđeva broj 18, u pravnoj stvari izvršnog  
vna prihode Trvat, Trg Magdolna broj 1, PIB  
jurići, sa poslednjom poznatom adresom ulica  
918,84 eura, na osnovu vjerodostojne isprav-  
19. godine za period od 2014. godine do 2018.  
riču od 2013. godine do 2018. godine, dana

### AVNIM OBJAVLJIVANJEM

dnjoni poznatom adresom ulica Piperska broj 6,  
g izvršitelja poslovne oznake Iv.br. 133/19 od  
03.07.2019. godine, isticanjem na oglasnoj tabli  
ampanom mađijju koji lžiži na oglasnoj tabli

ti javnom izvršitelju Vasiliju Miroviću na adresu  
na od dana poslednjog objavljivanja oglasa, radi  
i godine i dopunskog rješenja Iv.br. 133/19 od

da se ovakav način dostave smatra urođenim i da  
dostavljanja snositi sama stranka, odnosno izvršiti  
-dana od dana isticanja pismena na oglasnoj tabli  
službenom mađijju.

JAVNI IZVRŠITELJ  
Vasilije Mirović

## UNIVERZITET CRNE GORE Elektrotehnički fakultet u Podgorici

### O B A V J E Š T A V A

javnost da se doktorska disertacija „Analiza performansi novih tehnika za inženjering saobraćaja u ISP mrežama naredne generacije“, kandidatkinje mr Slavice Tomović, saradnice u nastavi na Elektrotehničkom fakultetu u Podgorici i Izvještaj Komisije za ocjenu doktorske disertacije, u sastavu:

**Dr Milica Pejanović - Đurišić, redovni profesor  
Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta Crne  
Gore,**

**Dr Igor Radusinović, redovni profesor  
Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta Crne  
Gore,**

**Dr Zoran Čiča, vanredni profesor  
Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u  
Beogradu,**

nalaze u Centralnoj univerzitetskoj biblioteci radi uvida javnosti, u trajanju od 30 dana od dana objavljivanja.

„DAN“ 4 07 2019.





Univerzitet Crne Gore  
Centralna univerzitetska biblioteka  
adresa / address\_ Cetinjska br. 2  
81000 Podgorica, Crna Gora  
telefon / phone\_ 00382 20 414 245  
faks\_ 00382 20 414 259  
mail\_ [cul@ucg.me](mailto:cul@ucg.me)  
web\_ [www.ucg.ac.me](http://www.ucg.ac.me)  
Central University Library  
University of Montenegro

Broj / Ref 016-16-134/1  
Datum / Date 26.08.2019.

Crna Gora  
UNIVERZITET CRNE GORE  
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET  
26. 08. 2019.

016-16-134/1

**UNIVERZITET CRNE GORE**  
**ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET**

N/r dekanu

Prof. dr Zoranu Veljoviću

Poštovani profesore Veljoviću,

Vraćamo doktorsku disertaciju „**Analiza performansi novih tehnika za inženjering saobraćaja u ISP mrežama naredne generacije**“, sa Izveštajem Komisije o ocjeni doktorske disertacije, kandidatkinje mr Slavice Tomović, koja je, u skladu sa članom 42 stav 3 Pravila doktorskih studija, dostavljena **Centralnoj univerzitetskoj biblioteci** dana 03. 07. 2019. godine, na uvid i ocjenu javnosti,.

Na gore pomenutu doktorsku disertaciju nije bilo primjedbi javnosti u predviđenom roku od 30 dana.

Nakon odbrane navedene doktorske disertacije, potrebno je dostaviti konačan primjerak disertacije u štampanoj i elektronskoj formi. Štampana i elektronska verzija disertacije treba da sadrži: izjavu o autorstvu, izjavu o istovjetnosti štampane i elektronske verzije dokorskog rada i izjavu o korišćenju. Sve moraju biti popunjene i potpisane od strane doktoranda.

S poštovanjem,



**DIREKTOR**  
*Bosiljka Cicmil*  
**mr Bosiljka Cicmil**

## BIOGRAFIJA

Slavica Tomović je rođena 05.02.1991. godine u Nikšiću, Republika Crna Gora. Osnovnu školu i Gimnaziju završila je u Nikšiću. Za pokazan uspjeh tokom osnovne i srednje škole nagrađena je diplomom Luča. Na Elektrotehnički fakultet u Podgorici, odsjek Elektronika, telekomunikacije i računari upisala se 2009. godine. Osnovne studije završila je sa prosječnom ocjenom A. Diplomirala je 2013. godine odbranom specijalističkog rada „Implementacija RIP i OSPF protokla rutiranja na Quagga softverskoj platformi“ sa prosječnom ocjenom A. Tokom osnovnih studija bila je korisnik stipendija Opštine Nikšić i stipendija Ministarstva nauke Crne Gore za talentovane studente. Na postdiplomske studije na Elektrotehničkom fakultetu u Podgorici, smjer Telekomunikacije, upisala se u septembru 2013. godine kod mentora prof. dr Igora Radusinovića. Magistarsku tezu pod nazivom: „Algoritmi rutiranja za podršku kvalitetu servisa u softverski definisanim mrežama“ uspješno je odbranila, sa prosječnom ocjenom A, u junu 2015. godine. Iste godine upisala je doktorske studije na Elektrotehničkom fakultetu u Podgorici. Doktorsku tezu pod nazivom „Analiza performansi novih tehnika za inženjering saobraćaja u ISP mrežama naredne generacije“ prijavila je 04.05.2017. godine, a polazna istraživanja odbranila 26.06.2017. godine.

Od septembra 2015. godine angažovana je u svojstvu saradnika u nastavi na Elektrotehničkom fakultetu u Podgorici i do 2016. godine bila je angažovana na sljedećim predmetima: Poslovne računarske mreže, Mobilne radiokomunikacije, Radiotehnika, Osnove analognih telekomunikacija, Osnove digitalnih telekomunikacija, Radiokomunikacije, Računarske mreže i komunikacije, Principi mobilnih komunikacija i Teorija električnih kola. Od 2016. saradnik je na predmetima: Telekomunikacione mreže, Komutacioni sistemi, Računarske mreže, Poslovne računarske mreže, Osnove analognih telekomunikacija, Osnove digitalnih telekomunikacija, Računarske mreže i komunikacije i Teorija električnih kola. Bila je angažovana i na predmetu Pomorske komunikacije (Pomorski fakultet u Kotoru) školske 2016/2017. godine.

U dosadašnjem naučnom radu bila je autor preko 30 naučnih radova objavljenih u renomiranim međunarodnim i domaćim časopisima i izlaganim u okviru programa međunarodnih i domaćih konferencija. Od toga, objavila je 7 radova u časopisima sa SCI liste, sa ukupnim impact faktorim 13.833. Slavica Tomović takođe obavlja dužnosti recezenta u više renomiranih časopisa sa SCI liste. Oblasti u kojima je postigla najznačajnije rezultate su softverski-definisane mreže, algoritmi za inženjering saobraćaja i garanciju kvaliteta servisa u komunikacionim sistemima naredne generacije.

Učestvovala je u više nacionalnih i evropskih naučnih projekata.

Govori engleski jezik.

# SPISAK RADOVA SA REZULTATIMA IZ DOKTORSKE TEZE

## RADOVI PUBLIKOVANI U ČASOPISIMA SA SCI LISTE:

1. S. Tomovic and I. Radusinovic, "RO-RO: Routing Optimality - Reconfiguration Overhead Balance in Software-Defined ISP Networks," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 37, no. 5, pp. 997-1011, May 2019.  
DOI: 10.1109/JSAC.2019.2906762  
Print ISSN: 0733-8716  
Link na rad: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8672627>  
Informacija o IMPACT faktoru časopisa: <https://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=49>
2. S. Tomovic and I. Radusinovic, "An effective use of SDN for virtual-link provisioning In ISP networks," in *IEICE Transactions on Communications*, Vol.E102-B, No.4, pp.855-864, April 2019.  
DOI: 10.1587/transcom.2018EBP3191  
ISSN: 0916-8516  
Link na rad: [https://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e102-b\\_4\\_855&category=-&lang=E&year=2019&abst=](https://search.ieice.org/bin/summary.php?id=e102-b_4_855&category=-&lang=E&year=2019&abst=)  
Informacija o IMPACT faktoru časopisa: <http://www.ieice.org/cs/jpn/EB/index.html>
3. S. Tomovic and I. Radusinovic, "Mapping Application Requirements to Virtualization-Enabled Software Defined WSN," *Wireless Personal Communications*, Vol. 97, Issue 2, November 2017, 1693-1709.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11277-017-4650-0>  
ISSN: 0929-6212  
Link na rad: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11277-017-4650-0>  
Informacija o IMPACT faktoru časopisa: <https://link.springer.com/journal/11277>
4. G. Davoli, W. Cerroni, S. Tomovic, C. Buratti, C. Contoli, F Callegati, "Intent-based service management for heterogeneous software-defined infrastructure domains," *International Journal of Network Management*, 2019; e2051.  
DOI: <https://doi.org/10.1002/nem.2051>  
ISSN: 1055-7148  
Link na rad: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/nem.2051>  
Informacija o IMPACT faktoru časopisa: <https://onlinelibrary.wiley.com/journal/10991190>
5. S. Tomovic, K. Yoshigoe, I. Maljevic, I. Radusinovic, "Software-Defined Fog Network Architecture for IoT," *Wireless Personal Communications*, Vol. 92, No. 1, pp. 181-196, January 2017.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11277-016-3845-0>  
ISSN: 0929-6212  
Link na rad: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11277-016-3845-0>  
Informacija o IMPACT faktoru časopisa: <https://link.springer.com/journal/11277>

6. G. Gardasevic, M. Veletic, N. Maletic, D. Vasiljevic, I. Radusinovic, S. Tomovic, M. Radonjic, "The IoT Architectural Framework, Design Issues and Application Domains", *Wireless Personal Communications*, Vol. 91, No. 1, pp. 127-148, January 2017.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11277-016-3842-3>  
ISSN: 0929-6212  
Link na rad: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11277-016-3842-3>  
Informacija o IMPACT faktoru časopisa: <https://link.springer.com/journal/11277>
  
7. S. Tomovic, M. Pejanovic-Djurisic, I. Radusinovic, "SDN based Mobile Networks: Concepts and Benefits", *Wireless Personal Communications*, Vol. 78, No. 3, pp. 1629-1644, 2014.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11277-014-1909-6>  
ISSN: 0929-6212  
Link na rad: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11277-014-1909-6>  
Informacija o IMPACT faktoru časopisa: <https://link.springer.com/journal/11277>

#### **RADOVI PUBLIKOVANI U DRUGIM ČASOPISIMA**

1. S. Tomovic, I. Radusinovic, "Traffic Engineering Approach to Virtual-link Provisioning in Software-defined ISP Networks," *Telfor Journal*, Vol. 10, No. 1, pp. 14-20, 2018, DOI: DOI:10.1109/telfor.2017.8249296, ISSN 1821-3251 (SCOPUS baza).
2. G. Gogic, S. Tomovic, I. Radusinovic, "Heterogeneous implementation of OpenFlow data-centre testbed", *ETF Journal of Electrical Engineering*, Vol. 23, No. 1, pp. 1-10, November 2017.

#### **RADOVI IZLOŽENI NA KONFERENCIJAMA**

1. S. Tomovic and I. Radusinovic, "A new traffic engineering approach for QoS provisioning and failure recovery in SDN-based ISP networks," 2018 23rd International Scientific-Professional Conference on Information Technology (IT), Žabljak, 2018, pp. 1-4. DOI: 10.1109/SPIT.2018.8350854, ISBN: 978-1-5386-3621-3.
2. S. Tomovic and I. Radusinovic, "Traffic engineering approach to virtual-link provisioning in software-defined ISP networks," 2017 25th Telecommunication Forum (TELFOR), Belgrade, 2017, pp. 1-4, DOI: 10.1109/TELFOR.2017.8249296, ISBN: 978-1-5386-3074-7.
3. G. Gogic, S. Tomovic, I. Radusinovic, "Performance evaluation of OpenFlow data centre network testbed", Proc. 22th Conference on Information Technologies IT 17, Žabljak, Montenegro, February 2017.
4. S. Tomovic et al., "An architecture for QoS-aware service deployment in software-defined IoT networks," 2017 20th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), 2017, pp. 561-567, DOI: 10.1109/WPMC.2017.8301875, ISBN: 978-1-5386-2769-3.
5. S. Tomovic, N. Lekic, G. Gardasevic, I. Radusinovic, "A New Approach to Dynamic Routing in SDN Networks", 2016 18th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), pp. 1-6, Lemesos, Cyprus, April 2016, DOI: 10.1109/MELCON.2016.7495433, Electronic ISBN: 978-1-5090-0058-6.
6. S. Tomovic, I. Radusinovic, "Fast and Efficient Bandwidth-delay Constrained Routing Algorithm for SDN Networks" ,IEEE NetSoft Conference, pp. 303-311, Seoul, South Korea, June 2016, DOI: 10.1109/NETSOFT.2016.7502426, Electronic ISBN: 978-1-4673-9486-4.

7. S. Tomovic, N. Prasad, I. Radusinovic, "Performance Comparison of QoS Routing Algorithms Applicable to Large-Scale SDN Networks", Proc. of IEEE Eurocon 2015, pp. 172-177, Salamanka, Spain, September 2015, DOI: 10.1109/EUROCON.2015.7313698, Electronic ISBN: 978-1-4799-8569-2.
8. S. Tomovic, M. Radonjic, I. Radusinovic, "Bandwidth-Delay Constrained Routing Algorithms for Backbone SDN Networks", Proc. of TELSIS 2015, pp. 227-230, Niš, Serbia, October 2015, DOI: 10.1109/TELSIS.2015.7357775, ISBN: 978-1-4673-7515-3.
9. M. Ratkovic, S. Tomovic, N. Zaric, M. Radonjic, I. Radusinovic, "SDN Network Emulation with Mininet Software Tool", Proc. 20th Conference on Information Technologies IT 15, pp. 80-83, Žabljak, Montenegro, February 2015.