

UNIVERZITET U BEOGRADU

SAOBRAĆAJNI FAKULTET

Branka Mikavica

**MODELI VERTIKALNE INTERKONEKCIJE
U MREŽAMA BUDUĆEG INTERNETA**

Doktorska disertacija

Beograd, 2019.

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF TRANSPORT AND TRAFFIC
ENGINEERING

Branka Mikavica

**MODELS OF VERTICAL
INTERCONNECTION IN THE FUTURE
INTERNET NETWORKS**

Doctoral dissertation

Belgrade, 2019.

Komisija za ocenu i odbranu doktorske disertacije

Mentor: **Dr Aleksandra Kostić-Ljubisavljević**, vanredni profesor
Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet

Članovi Komisije: **Dr Aleksandra Kostić-Ljubisavljević**, vanredni profesor
Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet

Dr Mirjana Stojanović, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet

Dr Goran Marković, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet

Dr Vesna Radonjić-Đogatović, vanredni profesor
Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet

Dr Predrag Ivaniš, redovni profesor
Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet

Datum odbrane: _____.

Rezime:

Interkonekcija, čiji primarni cilj je omogućavanje korisnicima jednog učesnika na tržištu telekomunikacija da komuniciraju sa korisnicima drugog učesnika, odnosno, obezbeđivanje pristupa servisima koje obezbeđuje drugi učesnik, javila se nakon liberalizacije tržišta telekomunikacija. Vertikalna interkonekcija predstavlja fizičko i logičko povezivanje učesnika na različitim nivoima mreže. U okruženju budućeg Interneta, sagledavanje tehničko-ekonomskih aspekata interkonekcije predstavlja pitanje od izuzetnog značaja. U opštem slučaju, učesnici u vertikalnoj interkonekciji u okruženju budućeg Interneta mogu biti provajderi sadržaja i aplikacija, provajderi Internet servisa, *Content Delivery Network* (CDN) provajderi i *cloud* provajderi. Pojava *Cloud Computing*-a uvela je značajne promene u Internet okruženju koje se pre svega odnose na mogućnost pristupa skalabilnim i deljivim, fizičkim ili virtuelnim resursima. Na taj način, stvara se elastična platforma koja obezbeđuje dinamičnu i jednostavnu skalabilnost, pojednostavljuje se obezbeđivanje infrastrukture i omogućava se unapređenje performansi. Razvoj servisa i aplikacija zahtevnih u pogledu propusnog opsega praćen širom implementacijom *Cloud Computing*-a utiče na kontinuiran rast Internet saobraćaja, što zahteva primenu tehnologija koje mogu zadovoljiti sve strože zahteve. Kao rešenje za transportni nivo mreže, razvijene su elastične optičke mreže koje mogu obezbediti dovoljne propusne opsege uz efikasno iskorišćenje spektra. Imajući u vidu promene koje prate razvoj okruženja budućeg Interneta, kao i značaj vertikalne interkonekcije, neophodno je razmotriti i jasno definisati tehničko-ekonomske relacije između učesnika u budućem Internetu, što je predmet istraživanja ove doktorske disertacije.

U okviru disertacije predložen je model koji ima za cilj određivanje adekvatnog ugovora o interkonekciji između učesnika u vertikalnoj interkonekciji, i to provajdera sadržaja i aplikacija i provajdera Internet servisa u procesu obezbeđivanja sadržaja krajnjim korisnicima, uz mogućnost parcijalne migracije sadržaja na resurse *cloud* provajdera. Analiza obuhvata različite ugovore o interkonekciji i određuje adekvatan ugovor, u zavisnosti od ciljnih profita provajdera koji učestvuju u vertikalnoj interkonekciji i prihvatljive stope odbijenih zahteva za obezbeđivanje sadržaja krajnjim korisnicima.

Data analiza je proširena istraživanjem adekvatnog mehanizma tarifiranja i alokacije resursa *cloud* provajdera. Predložen je nov, hibridni model pristupa resursima *cloud* provajdera koji obezbeđuje zadovoljavajuće rezultate u kontekstu minimizacije troškova i minimizacije stope odbijenih zahteva za pristup sadržajima.

Kako bi se unapredilo iskorišćenje resursa *cloud* provajdera, analizirane su aukcije kao dinamički mehanizmi tarifiranja i alokacije resursa u obliku aukcija. U okviru disertacije, predloženi su modeli za izbor odgovarajuće strategije pri kreiranju ponuda u okviru aukcija, kao i novi model za određivanje cena neiskorišćenih resursa *cloud* provajdera. Rezultati su potvrdili pretpostavku da mehanizmi aukcija, uz izbor adekvatne strategije pri kreiranju ponuda, mogu biti efikasno rešenje za povećanje iskorišćenosti resursa *cloud* provajdera i minimizaciju troškova korisnika *cloud* servisa.

Konačno, u ovoj doktorskoj disertaciji predložen je model koji ima za cilj optimizaciju alokacije sadržaja na *data* centre provajdera sadržaja i aplikacija i *cloud* provajdera uz istovremenu optimizaciju problema rutiranja i alokacije spektra u elastičnim optičkim mrežama u okviru analize procesa obezbeđivanja sadržaja uz mogućnost parcijalne migracije sadržaja na *cloud*. Predloženi model može se primeniti u različitim scenarijima mreža nezavisno od tražnje za obezbeđivanjem sadržaja i nezavisno od lokacije *data* centara *cloud* provajdera.

Ključne reči: vertikalna interkonekcija, vertikalna integracija, budući Internet, učesnici, tarifiranje i alokacija *cloud* resursa, elastične optičke mreže, problem rutiranja i alokacije spektra

Naučna oblast: Saobraćajno inženjerstvo

Uža naučna oblast: Informaciono-komunikacione tehnologije

UDK broj:

Abstract:

Interconnection, whose primary aim is enabling communication between end users of different undertakings, i.e. enabling access to the other undertaking's services, was introduced after the telecommunication market liberalization. Vertical interconnection represents the physical and logical linking of the undertakings on different network levels. Consideration of technical and economic aspects of the interconnection is a crucial issue in the future Internet environment. In general, undertakings in vertical interconnection in the future Internet environment include content and application providers, Internet service providers, Content Delivery Network (CDN) providers and Cloud providers. The development of Cloud Computing introduced significant changes in the Internet environment in terms of enabling access to scalable and shareable, physical or virtual resources. Therefore, the elastic platform for dynamic and simple scalability is enabled, the access to infrastructure is simplified and performances are improved. High bandwidth demanding services and applications, along with the wide adoption of Cloud Computing causes permanent growth of Internet traffic. This indicates that the introduction of new technologies, capable to satisfy high bandwidth requirements, is necessary. Elastic optical networks are proposed as a promising solution for transport networks. These networks provide enough bandwidth, along with high efficiency in spectrum utilization.

Forasmuch changes in the future Internet environment and the importance of the vertical interconnection, it is mandatory to consider and properly define technical and economic relations between undertakings in the future Internet environment, which is the research subject of this doctoral dissertation.

Within dissertation, a model for the determination of a proper interconnection agreement between undertakings in the vertical interconnection, content and application provider and an Internet service provider, in the content provisioning process with partial cloud migration is proposed. The analysis comprises different interconnection agreements and determines appropriate agreement, depending on the targeted providers' profits and satisfying requests' for content provisioning rejection rate. This analysis is

extended to determine adequate pricing and allocation mechanism for cloud provider's resources. A new, hybrid model for enabling access to cloud resources is proposed. The model provides satisfying results in terms of the costs' minimization and the minimization of requests' rejection rate.

In order to improve the utilization of a cloud provider's resources, the dynamic pricing and allocation mechanisms in the form of the auctions are analyzed. Within the dissertation, new models for the determination of an appropriate bidding strategy in the auction mechanism are proposed, along with a model for the determination of prices for idle resources of a cloud provider. The obtained results approve the assumption that auction mechanisms, with adequate bidding strategy selection, can be an effective solution for the improvement of the cloud provider's resources utilization and cost minimization of cloud services' customers.

Finally, in this doctoral dissertation, a model for the optimization of content placement in data centers of content and application provider and cloud provider, with concurrent optimization of routing and spectrum allocation problem in elastic optical networks in the content provisioning process with the possibility of partial cloud migration is proposed. The proposed model can be implemented in different network scenarios, regardless of the demand for content provisioning and cloud provider's data centers location.

Keywords: vertical interconnection, vertical integration, future Internet, undertakings, pricing and allocation of cloud resources, elastic optical networks, routing and spectrum allocation problem

Scientific field: Transport and traffic engineering

Field of academic expertise: Information and communication technologies

UDK number:

SADRŽAJ:

| | | |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. | UVOD | 1 |
| 2. | OSNOVNE KARAKTERISTIKE BUDUĆEG INTERNETA | 6 |
| 2.1. | Pravci istraživanja arhitekture budućeg Interneta | 6 |
| 2.2. | Koncept budućih mreža | 9 |
| 2.3. | Pokretači razvoja okruženja budućeg Interneta | 13 |
| 2.3.1. | <i>Rast obima Internet saobraćaja</i> | 13 |
| 2.3.2. | <i>Računarstvo u oblaku</i> | 15 |
| 2.3.3. | <i>Elastične optičke mreže</i> | 19 |
| 3. | VERTIKALNA INTERKONEKCIJA I RELACIJE IZMEĐU UČESNIKA U BUDUĆEM INTERNETU | 24 |
| 3.1. | Pojmovi vertikalne interkonekcije i vertikalne integracije u mrežama budućeg Interneta | 24 |
| 3.2. | Učesnici u vertikalnoj interkonekciji u mrežama budućeg Interneta i njihove karakteristike | 29 |
| 3.2.1. | <i>Provajderi sadržaja i aplikacija</i> | 29 |
| 3.2.2. | <i>Provajderi Internet servisa</i> | 32 |
| 3.2.3. | <i>CDN provajderi</i> | 34 |
| 3.2.4. | <i>Cloud provajderi</i> | 36 |
| 3.2.5. | <i>Krajnji korisnici</i> | 38 |
| 3.3. | Ugovori o vertikalnoj interkonekciji između učesnika u budućem Internetu | 39 |
| 3.3.1. | <i>Koncept Revenue Sharing</i> | 40 |
| 3.3.2. | <i>Koncept Cost Sharing</i> | 41 |
| 3.3.3. | <i>Koncept Retail Minus</i> | 41 |
| 3.3.4. | <i>Koncept Price Cap</i> | 42 |
| 3.3.5. | <i>Koncept Wholesale Price</i> | 43 |
| 3.3.6. | <i>Koncept Bill and Keep</i> | 43 |
| 3.4. | Relacije između provajdera sadržaja i aplikacija i provajdera Internet servisa | 44 |
| 3.5. | Relacije između provajdera Internet servisa | 45 |
| 3.5.1. | <i>Ugovori o tranzitiranju</i> | 45 |

| | | |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.5.2. | <i>Peering ugovori o interkonekciji</i> | 46 |
| 3.5.3. | <i>Sekundarni/regionalni peering</i> | 50 |
| 3.5.4. | <i>Plaćeni peering</i> | 50 |
| 3.5.5. | <i>Tačke interkonekcije u Internet okruženju</i> | 51 |
| 3.5.6. | <i>Faktori koji utiču na izbor ugovora o interkonekciji</i> | 52 |
| 3.6. | Relacije između <i>cloud</i> provajdera i korisnika <i>cloud</i> servisa..... | 56 |
| 3.7. | Promene u interkonekciji između učesnika u budućem Internetu | 59 |
| 4. | PREGLED RELEVANTNE LITERATURE..... | 64 |
| 4.1. | Ugovori o interkonekciji | 64 |
| 4.1.1. | <i>Koncept Revenue Sharing</i> | 64 |
| 4.1.2. | <i>Koncept Cost Sharing</i> | 66 |
| 4.1.3. | <i>Koncept Wholesale Price</i> | 67 |
| 4.2. | Pregled mehanizama tarifiranja i alokacije resursa u <i>cloud</i> okruženju..... | 68 |
| 4.2.1. | <i>Pregled aukcijskih mehanizama za tarifiranje i alokaciju cloud resursa</i> | 71 |
| 4.2.2. | <i>Strategije kreiranja ponuda u mehanizmima tarifiranja zasnovanim na aukcijama</i> | 74 |
| 4.3. | Pregled algoritama za rutiranje i alokaciju spektra u elastičnim optičkim mrežama..... | 76 |
| 5. | PREDLOŽENI MODELI VERTIKALNE INTERKONEKCIJE I TEHNIČKO-EKONOMSKIH RELACIJA IZMEĐU UČESNIKA U BUDUĆEM INTERNETU | 81 |
| 5.1. | Modelovanje ugovora o interkonekciji između provajdera sadržaja i aplikacija i provajdera Internet servisa uz mogućnost migracije na <i>cloud</i> | 81 |
| 5.1.1. | <i>Modelovanje karakteristika zahteva za obezbeđivanje sadržaja</i> | 84 |
| 5.1.2. | <i>Ugovori o interkonekciji</i> | 86 |
| 5.1.3. | <i>Analiza rezultata</i> | 89 |
| 5.2. | Model za određivanje odgovarajućeg tarifnog mehanizma za pristup resursima <i>cloud</i> provajdera od strane provajdera sadržaja i aplikacija..... | 99 |
| 5.2.1. | <i>Troškovi provajdera sadržaja i aplikacija</i> | 100 |
| 5.2.2. | <i>Analiza rezultata</i> | 102 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.3. Modelovanje mehanizma pristupa neiskorišćenim resursima <i>cloud</i> provajdera u vidu <i>spot</i> instanci primenom aukcija | 106 |
| 5.3.1. <i>Izbor strategije za formiranje ponuda u procesu aukcija</i> | 107 |
| 5.3.2. <i>Modelovanje prihoda cloud provajdera</i> | 108 |
| 5.3.3. <i>Analiza rezultata</i> | 110 |
| 5.4. Modelovanje mehanizma pristupa neiskorišćenim resursima <i>cloud</i> provajdera u vidu <i>spot block</i> instanci primenom aukcija..... | 113 |
| 5.4.1. <i>Modelovanje spot block cena</i> | 114 |
| 5.4.2. <i>Strategije kreiranja ponuda korisnika cloud resursa</i> | 115 |
| 5.4.3. <i>Mehanizmi aukcija za obezbeđivanje pristupa spot block instancama cloud provajdera</i> | 117 |
| 5.4.4. <i>Analiza rezultata</i> | 120 |
| 5.5. Rutiranje i alokacija spektra u elastičnim optičkim mrežama u procesu obezbeđivanja sadržaja uz mogućnost migracije na <i>cloud</i> | 124 |
| 5.5.1. <i>Formulacija modela</i> | 124 |
| 5.5.2. <i>Ilustrativni primer rešavanja problema alokacije sadržaja i problema rutiranja i alokacije spektra</i> | 134 |
| 5.5.3. <i>Analiza rezultata</i> | 137 |
| 6. ZAKLJUČAK | 147 |
| LITERATURA | 151 |
| BIOGRAFIJA AUTORA | 166 |
| Izjava o autorstvu..... | 167 |
| Izjava o istovetnosti štampane i elektronske verzije doktorskog rada..... | 168 |
| Izjava o korišćenju..... | 169 |

Spisak slika

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Slika 2.1 Osnovni ciljevi i zahtevi arhitekture budućih mreža..... | 11 |
| Slika 2.2 Razlika između fiksne i fleksibilne rešetke..... | 21 |
| Slika 2.3 Arhitektura elastične optičke mreže..... | 21 |
| Slika 3.1 Relacije između učesnika u procesu obezbeđivanja pristupa sadržaju | 26 |
| Slika 5.1 Šematski prikaz procesa obezbeđivanja sadržaja uz mogućnost migracije sadržaja na <i>cloud</i> | 83 |
| Slika 5.2 Prosečna tražnja za propusnim opsegom po vremenskim intervalima | 90 |
| Slika 5.3 Prosečne vrednosti neiskorišćenih kapaciteta provajdera sadržaja i aplikacija..... | 91 |
| Slika 5.4 Prosečna stopa odbijenih zahteva za obezbeđivanje sadržaja | 92 |
| Slika 5.5 Prosečan obim saobraćaja opslužen preko <i>cloud</i> CDN-a..... | 93 |
| Slika 5.6 Troškovi provajdera sadržaja i aplikacija | 93 |
| Slika 5.7 Prosečni prihodi <i>cloud</i> provajdera | 112 |
| Slika 5.8 Ilustrativni primer problema optimizacije bez migracije na <i>cloud</i> | 135 |
| Slika 5.9 Ilustrativni primer problema optimizacije sa migracijom na <i>cloud</i> | 136 |
| Slika 5.10 Razmatrane topologije elastičnih optičkih mreža | 137 |

Spisak tabela

| | | |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 2.1 | Prognozirani rast obima Internet saobraćaja (2017-2022. godina) | 14 |
| Tabela 2.2 | Kategorije <i>cloud</i> servisa i vrste <i>cloud</i> funkcionalnosti | 16 |
| Tabela 5.1 | Vrednosti parametara Poasonove raspodele za modelovanje zahteva za obezbeđivanje sadržaja | 89 |
| Tabela 5.2 | Standardi kvaliteta video sadržaja u pogledu propusnog opsega | 90 |
| Tabela 5.3 | Profit provajdera sadržaja i aplikacija - <i>Revenue Sharing</i> ugovor | 94 |
| Tabela 5.4 | Profit provajdera sadržaja i aplikacija - <i>Cost Sharing</i> ugovor (izraženo u milionima novčanih jedinica)..... | 95 |
| Tabela 5.5 | Profit provajdera sadržaja i aplikacija - <i>Wholesale Price</i> ugovor (izraženo u milionima novčanih jedinica)..... | 96 |
| Tabela 5.6 | Profit provajdera Internet servisa - <i>Revenue Sharing</i> ugovor (izraženo u milionima novčanih jedinica)..... | 96 |
| Tabela 5.7 | Profit provajdera Internet servisa - <i>Cost Sharing</i> ugovor (izraženo u milionima novčanih jedinica) | 97 |
| Tabela 5.8 | Profit provajdera Internet servisa - <i>Wholesale Price</i> ugovor (izraženo u milionima novčanih jedinica)..... | 98 |
| Tabela 5.9 | Troškovi provajdera sadržaja i aplikacija - tarifni mehanizam na zahtev (izraženo u hiljadama novčanih jedinica) | 104 |
| Tabela 5.10 | Stopa odbijenih zahteva za obezbeđivanje sadržaja - tarifni mehanizam na zahtev | 104 |
| Tabela 5.11 | Troškovi provajdera sadržaja i aplikacija - tarifni mehanizam rezervacije (izraženo u hiljadama novčanih jedinica)..... | 104 |
| Tabela 5.12 | Stopa odbijenih zahteva za obezbeđivanje sadržaja - tarifni mehanizam rezervacije | 104 |

| | | |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 5.13 | Troškovi provajdera sadržaja i aplikacija - hibridni tarifni mehanizam (izraženo u hiljadama novčanih jedinica) | 105 |
| Tabela 5.14 | Stopa odbijenih zahteva za obezbeđivanje sadržaja - hibridni tarifni mehanizam | 105 |
| Tabela 5.15 | Prosečne vrednosti <i>spot</i> cena po vremenskom intervalu..... | 111 |
| Tabela 5.16 | Prosečne vrednosti ponuda koje obezbeđuju pravo pristupa resursima u aukcijama (izražene u \$)..... | 122 |
| Tabela 5.17 | Prosečne vrednosti prihoda <i>cloud</i> provajdera u vremenskom intervalu po instanci (izražene u \$)..... | 122 |
| Tabela 5.18 | Prosečne uštede u poređenju sa cenama instanci na zahtev (izražene u %)..... | 123 |
| Tabela 5.19 | Karakteristike i tražnja za pristupom grupama sadržaja | 135 |
| Tabela 5.20 | Karakteristike razmatranih scenarija elastičnih optičkih mreža | 139 |
| Tabela 5.21 | Određivanje parametara u višeatributivnom odlučivanju za INT9, $\alpha = 0,4$ | 140 |
| Tabela 5.22 | Tražnja za propusnim opsegom za proizvoljnu instancu INT9 mreže | 141 |
| Tabela 5.23 | Rezultati simulacija za proizvoljnu instancu INT9 mreže | 142 |
| Tabela 5.24 | Određivanje parametara za Euro28, $\alpha = 0,4$ | 142 |
| Tabela 5.25 | Tražnja za propusnim opsegom za proizvoljnu instancu Euro28 mreže..... | 143 |
| Tabela 5.26 | Rezultati simulacija za proizvoljnu instancu Euro28 mreže | 144 |
| Tabela 5.27 | Poređenje MILP modela za INT9 mrežu, $\alpha = 0,4$ | 144 |
| Tabela 5.28 | Poređenje MILP modela za INT9 mrežu, $\alpha = 0,4$ | 145 |

Spisak skraćenica

A

AFA-CA *Adaptive Frequency Assignment - Collision Avoidance*

B

BVT *Bandwidth Variable Transponder*

BV-WXC *Bandwidth Variable Wavelength Cross-Connect*

C

CaaS *Communication as a Service*

CDN *Content Delivery Network*

CompaaS *Compute as a Service*

D

DADCM *Disaster-Aware Dynamic Content Management*

DSaaS *Data Storage as a Service*

E

EIFFEL *Evolved Internet Future for European Leadership*

EON *Elastic Optical Network*

F

FDC *Fully Distributed Costs*

FG-FN *Focus Group on Future Networks*

FIND *Future Internet Design*

FIRE *Future Internet Research and Experimentation*

G

GENI *Global Environment for Network Innovations*

H

HDTV *High Definition Television*

I

IaaS *Infrastructure as a Service*

ILP *Integer Linear Programming*

ITU *International Telecommunication Union*

L

LRAIC *Long Run Average Incremental Cost*

LRIC *Long Run Incremental Cost*

M

MILP *Mixed Integer Linear Programming*

N

NaaS *Network as a Service*

NIST *National Institute of Standards and Technology*

NSF *National Science Foundation*

O

OTT *Over-The-Top*

P

PaaS *Platform as a Service*

PM-16-QAM *Polarization Mode 16-State Quadrature Amplitude Modulation*

PM-8-QAM *Polarization Mode 8-State Quadrature Amplitude Modulation*

PM-BPSK *Polarization Mode Binary Phase Shift Keying*

PM-QPSK *Polarization Mode Quadrature Phase Shift Keying*

Q

QAM *Quadrature Amplitude Modulation*

QPSK *Quadrature Phaze Shift Keying*

R

RMSA *Routing, Modulation, and Spectrum Allocation*

RSA *Routing and Spectrum Allocation*

S

SaaS *Software as a Service*

SLA *Service Level Agreement*

T

TELRIC *Total Element Long Run Incremental Cost*

TS *Tabu Search*

TSLRIC *Total Service Long Run Incremental Cost*

V

VM *Virtual Machine*

1. UVOD

Interkonekcija predstavlja jedno od ključnih pitanja za učesnike na tržištu telekomunikacija, kako sa tehničkog, tako i sa ekonomskog i regulatornog aspekta. Osnovni ciljevi interkonekcije su obezbeđivanje komunikacije između korisnika različitih učesnika ili pristupa servisima koje obezbeđuje drugi učesnik, kao i povećanje profitabilnosti i unapređivanje servisa koji su od značaja za korisnike. Pod vertikalnom interkonekcijom podrazumeva se fizičko i logičko povezivanje učesnika koji se nalaze na različitim nivoima mreže. Učesnici u vertikalnoj interkonekciji, u opštem slučaju, mogu biti: provajdere sadržaja i aplikacija (provajdere SA), provajdere Internet servisa (provajdere IS), provajdere za distribuciju sadržaja (*Content Delivery Network*, CDN) i *cloud* provajdere. Ovi učesnici najčešće se karakterišu različitim skupom funkcionalnosti, što zavisi od toga da li i u kojoj meri njihovi poslovni modeli podrazumevaju vertikalnu integraciju.

Promene u Internet okruženju postavljaju sve veće zahteve pred učesnike u vertikalnoj interkonekciji, što se naročito odnosi na provajdere SA i provajdere IS. Provajderi SA (na primer, *Netflix*, *Facebook*, *YouTube*, *Skype*, *eBay* itd.) kreiraju i agregiraju sadržaje (na primer, veb stranice, blogove, nepokretne slike, video sadržaje itd.) ili aplikacije (na primer, pretraživači, aplikacije za slanje poruka itd.). U cilju obezbeđivanja sadržaja krajnjim korisnicima, neophodno je omogućiti interkonekciju između provajdera SA i provajdera IS. Provajderi IS obezbeđuju širokopolasni pristup Internetu na maloprodajnom nivou i veleprodajnom nivou kroz tranzit i druge oblike interkonekcije. Takođe obezbeđuju pristup krajnjim korisnicima i provajderima SA.

Provajderi SA imaju za cilj obezbeđivanje sadržaja na što kraćim rastojanjima od krajnjih korisnika i, kada je to moguće, teže vertikalnoj integraciji. Približavanje krajnjim korisnicima kroz strategije vertikalne integracije moguće je samo za velike provajdere SA. Na taj način, provajderi SA mogu, na primer, imati sopstvene servere, izgraditi sopstvenu mrežnu infrastrukturu ili mogu samostalno obezbeđivati CDN

servise. Ovo može biti ekonomski isplativo rešenje koje dodatno pruža veću kontrolu nad procesom obezbeđivanja sadržaja. Manji provajderi SA iznajmljuju *upstream* i *hosting* kapacitete od provajdera IS i/ili CDN provajdera.

Investiranje u rešenja koja uključuju vertikalnu integraciju ojačava poziciju provajdera SA u pregovorima o interkonekciji sa provajderima IS. Najpre, skladištenjem sadržaja na lokacijama koje su bliže krajnjem korisniku smanjuje se kašnjenje i unapređuje se iskustveni kvalitet. Primena ovog pristupa omogućava da se sadržaj dostavlja samo jednom, i to od provajdera SA do servera. Svaki pojedinačni zahtev za obezbeđivanje sadržaja iziskuje obezbeđivanje sadržaja od servera koji su bliži lokaciji krajnjeg korisnika, čime se minimiziraju dužine putanja. Ovim lokalnim čuvanjem sadržaja smanjuje se potreba za tranzitiranjem saobraćaja, smanjuje se verovatnoća zagušenja, kao i troškovi tranzitiranja i *peering* saobraćaj. Takođe, provajderi SA koji imaju mogućnost vertikalne integracije konkurentniji su u odnosu na druge provajdere SA.

S druge strane, provajderi IS imaju za cilj proširenje poslovanja na osnovu obezbeđivanja servisa provajderima SA na veleprodajnom nivou. Ovi provajderi teže investicijama u platforme za obezbeđivanje aplikacija kako bi održali profitabilnost i obezbedili nove izvore prihoda. Time ovi provajderi postaju direktna konkurencija provajderima SA.

S obzirom da se u poslednje vreme sve više uspostavlja direktna interkonekcija između provajdera SA i provajdera IS koji obezbeđuju pristup, provajderi IS koji obezbeđuju tranzitiranje saobraćaja teže uvođenju novih servisa u cilju održavanja svojih prihoda. Uspostavljanje direktne interkonekcije između provajdera na osnovu ugovora o *peering*-u omogućava pristup lokalno, umesto preko *upstream* provajdera koji obezbeđuje tranzitiranje. Time ugovori o *peering*-u postaju supstitut za ugovore o tranzitiranju saobraćaja.

Imajući u vidu dinamiku i promene u Internet okruženju, od izuzetnog je značaja adekvatno odrediti preferencije korisnika i tražnju za pristup sadržajima i aplikacijama. S tim u vezi, najznačajniji izazovi u budućem Internetu uključuju zahteve za unapređivanje skalabilnosti, kvaliteta servisa, heterogenosti uređaja, mreža i aplikacija,

kao i obezbeđivanje jače podrške interaktivnim aplikacijama. Poznato je da obezbeđivanje resursa koji zadovoljavaju maksimalnu tražnju predstavlja troškovno neefikasan pristup. Računarstvo u oblaku (*Cloud Computing*) može imati značajnu ulogu u prevazilaženju navedenih izazova. Računarstvo u oblaku omogućava pristup skalabilnim, elastičnim i deljivim fizičkim ili virtuelnim resursima. Virtuelizacija, kao jedna od najznačajnijih karakteristika računarstva u oblaku, dovela je do transformacije konvencionalnih *data* centara u fleksibilnu *cloud* infrastrukturu. Pre pojave *cloud* provajdera, osnovni način prevazilaženja izazova u pogledu performansi, dostupnosti i skalabilnosti bio je fizička replikacija postojeće infrastrukture na druge geografski distancirane lokacije, a sve u cilju smanjivanja razdaljine između krajnjih korisnika i servera na kojima su skladišteni sadržaji. Ovakvo rešenje ne samo da je troškovno neefikasno, već zahteva i određivanje najbolje strategije za replikaciju i lociranje servera. S druge strane, pristup resursima *cloud* provajdera omogućava efikasniji i ekonomičniji način proširenja infrastrukture, kao i skalabilnost u praktično beskonačnim resursima kojima se pristupa na zahtev.

Cloud provajderi obezbeđuju neograničen pristup računarskim resursima (mrežnu infrastrukturu, skladištenje i obradu) preko niza fizičkih servera dislociranih globalno. Stoga, integracija *cloud* resursa i sopstvenih resursa provajdera SA može predstavljati sveobuhvatan, ekonomski održiv sistem koji zadovoljava zahteve za pristup sadržajima. Takav sistem ostvaruje brojne prednosti u pogledu elastične platforme za dinamičnu i jednostavnu skalabilnost, pojednostavljuje obezbeđivanje infrastrukture i omogućava upravljanje performansama na osnovu kvaliteta servisa.

Unapređenjem servisa i aplikacija zahtevnih u pogledu propusnog opsega, kao što su video na zahtev i računarstvo u oblaku, dolazi do konstantnog rasta Internet saobraćaja. Poslednjih godina, Internet saobraćaj u najvećoj meri je generisan od strane ograničenog broja velikih učesnika: vodećih provajdera SA, i vodećih *cloud* provajdera (na primer, *Amazon*, *Microsoft Azure*). Pojava velikih provajdera SA na globalnom nivou značajno utiče na relacije između provajdera u Internet okruženju. Ovi globalni provajderi imaju bolju poziciju u pregovorima o interkonekciji, a na osnovu obezbeđivanja ekskluzivnih

sadržaja i aplikacija potencijalno mogu uticati i na odluke krajnjih korisnika u pogledu izbora provajdera IS.

Unapređena virtuelizacija, standardizacija i automatizacija *cloud data* centara obezbeđuje bolje performanse i veće kapacitete. Međutim, koncentracija kapaciteta za skladištenje i obradu podataka u relativno malom broju *data* centara uzrokuje značajno povećanje obima saobraćaja na linkovima u mreži koji su susedni sa datim *data* centrima. Rast obima Internet saobraćaja zahteva implementaciju tehnologija koje mogu podržati sve strože zahteve u pogledu propusnog opsega. Obećavajuće rešenje za transportni nivo mreže koja može podržati troškovno efikasno obezbeđivanje sadržaja predstavljaju elastične optičke mreže (*Elastic Optical Networks, EON*). Osnovna prednost elastičnih optičkih mreža je veća granularnost u alokaciji propusnog opsega. Naime, za EON važi da se raspoloživi propusni opseg deli na manje segmente spektra. Odgovarajući broj susednih segmenata spektra dodeljuje se putu svetlosti u zavisnosti od zahtevanog propusnog opsega. Kapacitet puta svetlosti može se adaptivno proširivati ili smanjivati alokacijom odgovarajućeg broja segmenata spektra koji zadovoljavaju tražnju. Stoga, iskorišćenje resursa u EON je značajno unapređeno u poređenju sa konvencionalnim optičkim mrežama.

Uzimajući u obzir sve prethodno navedeno, kao i značajan rast obima saobraćaja i razvoj novih tehnologija, neophodna su značajna ulaganja u razvoj novih kapaciteta, razvoj novih poslovnih modela i bolji uvid u relacije između učesnika u vertikalnoj interkonekciji, što je osnovni motiv za izradu ove doktorske disertacije.

Predmet istraživanja ove doktorske disertacije su problemi određivanja odgovarajućih relacija pri vertikalnoj interkonekciji učesnika u budućem Internetu. Imajući u vidu složenost relacija između učesnika u vertikalnoj interkonekciji, predmet doktorske disertacije je i optimalna iskorišćenost resursa u procesu obezbeđivanja sadržaja krajnjim korisnicima.

Naučni cilj istraživanja je sagledavanje tehničko-ekonomskih aspekata vertikalne interkonekcije učesnika u budućem Internetu. Na osnovu tih istraživanja razvijeni su originalni modeli za određivanje odgovarajućih relacija između učesnika u vertikalnoj

interkonekciji u okruženju budućeg Interneta. Najpre, razvijen je model za određivanje ugovora o interkonekciji između vertikalno integrisanog provajdera SA i provajdera IS u procesu obezbeđivanja sadržaja krajnjim korisnicima uz mogućnost migracije na *cloud*. Zatim, predložen je model za određivanje adekvatnog tarifnog mehanizma za pristup resursima *cloud* provajdera u slučaju vertikalne interkonekcije provajdera SA sa *cloud* provajderima, kao i model za određivanje odgovarajuće strategije pri definisanju mehanizma pristupa neiskorišćenim resursima *cloud* provajdera. Takođe, predložen je model koji je razvijen za potrebe optimizacije problema alokacije sadržaja i rutiranja i alokacije spektra u elastičnim optičkim mrežama, pri obezbeđivanju sadržaja krajnjim korisnicima u kojem učestvuju vertikalno integrisan provajder SA, provajderi IS i *cloud* provajder.

U skladu sa definisanim predmetom i naučnim ciljevima, sprovedeno je istraživanje čiji su rezultati prikazani u ovoj doktorskoj disertaciji. Sadržaj disertacije organizovan je u šest poglavlja. Nakon uvodnih razmatranja koja obuhvataju motive, predmet i cilj istraživanja doktorske disertacije, u drugom poglavlju je ukazano na ciljeve i zahteve koje treba da zadovolji okruženje budućeg Interneta. U trećem poglavlju su definisani pojmovi vertikalne interkonekcije i vertikalne integracije između učesnika u budućem Internetu. Takođe, data je detaljna analiza karakteristika učesnika i definisane su relevantne, tehničko-ekonomske relacije između posmatranih učesnika u vertikalnoj interkonekciji u mrežama budućeg Interneta. Pregled relevantne literature dat je u četvrtom poglavlju. S obzirom na to da je u okviru disertacije predloženo nekoliko nezavisnih modela za rešavanje problema koji se javljaju pri vertikalnoj interkonekciji učesnika u budućem Internetu, u ovom poglavlju su zasebno dati pregledi relevantne literature koja se bavi ugovorima o interkonekciji, tarifnim mehanizmima i alokaciji resursa *cloud* provajdera i optimizaciji problema rutiranja i alokacije spektra u elastičnim optičkim mrežama. U petom poglavlju prikazani su predloženi modeli koji su razvijeni u ovoj doktorskoj disertaciji, kao i analiza dobijenih rezultata. U poslednjem poglavlju data su zaključna razmatranja i konačna analiza istraživanja sprovedenog u okviru doktorske disertacije. Takođe su naznačeni i pravci budućih istraživanja u oblasti vertikalne interkonekcije i uspostavljanja optimalnih relacija između učesnika u budućem Internetu.

2. OSNOVNE KARAKTERISTIKE BUDUĆEG INTERNETA

Tokom višedecenijskog razvoja, Internet je postao sastavni, neodvojiv deo svakodnevnog života, poslovanja i društva u celini. Ipak, brojni tehnički i ekonomski izazovi koji su se javili tokom razvoja, uzrokuju potrebu za novom arhitekturom Interneta. Pokazalo se da originalni koncept Interneta ima izvesna ograničenja, kao što su: ograničen adresni prostor, nedostatak efikasnog i skalabilnog upravljanja mrežom, nedostatak diferencijacije servisa, nedovoljna podrška razvoju aplikacija i nedovoljna energetska efikasnost [Pap12], [Zie13].

Unapređenjem optičkih komunikacionih sistema, bežičnih komunikacionih sistema, razvojem novih kapaciteta za skladištenje podataka, inovacijama u proizvodnji opreme (pre svega senzora i računarskih komponenti) i unapređenjem nanotehnologija, moguće je prevazići prethodno pomenute izazove [Mee12], [Pal12]. Zahtevi u pogledu obezbeđivanja mogućnosti pristupa Internetu bilo kada i bilo gde, povezivanja objekata i uređaja, skalabilnosti, obezbeđivanja sadržaja zahtevnih u pogledu propusnog opsega i daljem razvoju pametnih aplikacija, postaju sve stroži [Jap13], [Alb13]. Ove činjenice ukazuju na potrebu za promenama originalnog koncepta Interneta, koje bi dovele do arhitekture budućeg Interneta. Budući Internet predstavlja globalno okruženje koje povezuje ogroman, otvoren skup heterogenih i autonomnih resursa koji imaju mogućnost interakcije nezavisne od vremena i mesta [Cap15], [Tro10], [Win15].

2.1. Pravci istraživanja arhitekture budućeg Interneta

Moguće je uočiti dva istraživačka pravca koja se tiču inovacija usmerenih ka nastanku budućeg Interneta: *clean-slate* pristup i evolutivni pristup [Pan11], [Tar16], [Mar11].

Clean-slate pristup podrazumeva razvoj potpuno nove arhitekture budućeg Interneta koja unapređuje upravljanje, integraciju i adaptaciju na promene usled sve većih zahteva. Polazna osnova zagovornika ovog pristupa je pretpostavka da je postojeća arhitektura Interneta nedovoljno robusna da podrži dalji razvoj servisa, sadržaja i aplikacija, a bezbednost se navodi kao dodatni razlog za razvoj nove arhitekture [ITU11a]. Arhitektura budućeg Interneta ne predstavlja unapređenje pojedinačnih ciljeva. *Clean-slate* rešenje usmereno samo na pojedinačne ciljeve može zadržati nepromenjen ostatak arhitekture. Skup različitih *clean-slate* rešenja usmerenih na rešavanje različitih ciljeva ne mora nužno predstavljati novu arhitekturu Interneta. Umesto toga, cilj je potpuno izmeniti celokupnu arhitekturu, uzimajući u obzir sve aspekte (performanse, mobilnost, bezbednost itd.). Takva arhitektura treba da bude dovoljno fleksibilna i prilagodljiva promenama u budućnosti. Važan aspekt istraživanja u pogledu kreiranja nove arhitekture Interneta je i mogućnost testiranja. Potrebno je razviti otvorene, virtuelne arhitekture dovoljnog obima, koje neće narušiti obezbeđivanje postojećih servisa. Pre implementacije, nove arhitekture treba testirati i unaprediti eksperimentisanjem na virtuelnim resursima. Istraživačke inicijative u cilju razvoja arhitekture budućeg Interneta podržane su od strane različitih fondacija širom sveta [ITU11a], [Pan11], [Sch14], [Tse09], [Cor11]. Neke od tih inicijativa navedene su u nastavku.

National Science Foundation (NSF) u Sjedinjenim Američkim Državama osnovao je dve inicijative:

- *Global Environment for Network Innovations* (GENI) ima za cilj podršku istraživanjima na deljenoj, heterogenoj infrastrukturi, promoviše razvoj mreža, tehnologija, servisa i aplikacija i posreduje u saradnji akademske zajednice, privrede i šire javnosti, kako bi se podstakla revolucionarna rešenja i inovacije [ITU11a].
- *Future Internet Design* (FIND) je najznačajnija dugoročna inicijativa NSF-a. Imala je za cilj razmatranje budućih zahteva globalne mreže, principe i mehanizme izgradnje takve mreže koja neće imati ograničenja originalne arhitekture Interneta, odnosno, kreiranje potpuno nove arhitekture [ITU11a].

Stanford Clean Slate Project je još jedan projekat pokrenut s ciljem prevazilaženja fundamentalnih ograničenja arhitekture originalnog Interneta, primene novih tehnologija (optičkih, bežičnih i senzorskih mreža), obezbeđivanja novih servisa, aplikacija, virtuelnog okruženja i stvaranja pokretačke snage za dalji razvoj. Ovaj projekat obuhvatao je tehničke, ekonomske, ali i regulatorne izazove današnjeg i budućeg Interneta. Interdisciplinarni tim angažovan na ovom projektu obuhvatao je istraživače iz akademske zajednice, privrede i istraživačkih laboratorija pod pokroviteljstvom države [ITU11a].

AKARI Architecture Design Project osnovan je od strane Nacionalnog instituta za informaciono-komunikacione tehnologije u Japanu. Osnovna ideja ovog projekta bila je pronalaženje idealnog rešenja na osnovu istraživanja potpuno nove arhitekture mreže koja neće biti pod uticajem postojećih ograničenja [ITU11a].

Evropska unija je takođe formirala fondove za slične inicijative, kao što su:

- *Future Internet Research and Experimentation (FIRE)*: cilj je bio rešavanje prognoziranih zahteva budućeg Interneta na osnovu stvaranja okruženja pogodnog za investiranje i istraživanje novih, revolucionarnih ideja [ITU11a].
- *Evolved Internet Future for European Leadership (EIFFEL)*: konzorcijum od osam partnera iz različitih zemalja u Evropi koji je imao za cilj angažovanje istraživača na analizi budućeg Interneta, primenjujući potpuno novi pristup [ITU11a].

Evolutivni pristup razvoja budućeg Interneta za polaznu osnovu ima originalnu arhitekturu Interneta. Zagovornici evolutivnog pristupa smatraju da se današnji Internet učvrstio kao okosnica društvenog, ekonomskog razvoja i globalizacije, kao i da bilo koja nagla promena u arhitekturi Interneta može biti previše složena za implementaciju, uz mogućnost pojave negativnih efekata na društveno-ekonomski poredak u svetu. Takve izmene bi uvele dodatnu složenost, nekonzistentnost i degradaciju performansi, te stoga ne bi bile održive u dugom roku. Takođe, pristalice ovog pristupa ukazuju na to da se originalna arhitektura Interneta pokazala dovoljno robusnom i skalabilnom da zadovolji nove zahteve za obezbeđivanjem servisa, sadržaja i aplikacija.

Imajući u vidu rizike koje nosi *clean-slate* pristup u pogledu degradacije performansi u obezbeđivanju postojećih servisa, kao i probleme sa pouzdanošću i skalabilnošću koji mogu nastati kao posledica izmena postojeće arhitekture za obezbeđivanje novih servisa, sadržaja i aplikacija, kompromisno rešenje bilo bi ono koje usvaja prednosti oba predložena pristupa. Na taj način, prelazak na bilo koju novu arhitekturu treba da bude takav da je nova arhitektura u potpunosti interoperabilna sa postojećom arhitekturom, čime se obezbeđuje kontinuitet u obezbeđivanju servisa, sadržaja i aplikacija. Nova arhitektura, pored toga što treba da bude potpuno interoperabilna sa postojećom arhitekturom i transparentna za korisnike, treba da obezbedi pouzdanu osnovu za implementaciju novih servisa i aplikacija.

2.2. Koncept budućih mreža

Međunarodna unija za telekomunikacije (*International Telecommunication Union*, ITU) aktivno se bavila razvojem nekoliko tehničkih i regulatornih aspekata različitih tehnologija koje bi mogle biti osnova budućeg Interneta. Formirane su različite studijske grupe (*ITU Study Groups*) sa ciljem istraživanja zahteva, arhitekture, interoperabilnosti, daljeg razvoja i konvergencije budućih mreža. 2009. godine ustanovljena je fokusna grupa u okviru ITU, *Focus Group on Future Networks* (FG-FN), koja ima za cilj utvrđivanje potencijalnih pravaca razvoja budućih mreža na osnovu novih tehnologija, utvrđivanje mogućih interakcija između budućih mreža i novih servisa, kao i usklađivanje ITU i drugih organizacija za standardizaciju sa karakteristikama budućih mreža. Na osnovu tih istraživanja, nastao je niz ITU-T preporuka o budućim mrežama (preporuke od ITU-T Y.3000 do ITU-T Y.3499) koje pripadaju seriji Y (*Global Information Infrastructure, Internet Protocol aspects, Next-Generation Networks, Internet of Things and Smart Cities*) [ITU19].

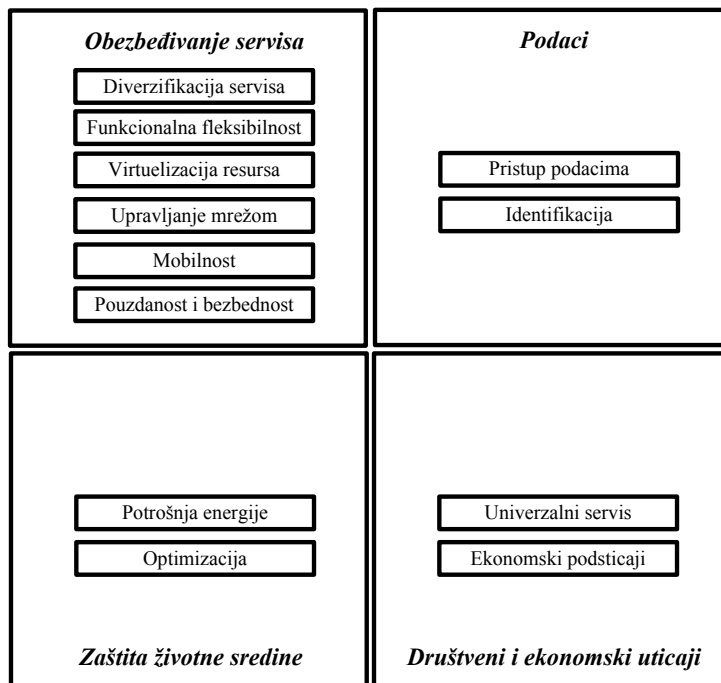
Prema preporuci ITU-T Y.3001, buduća mreža može da obezbedi servise, kapacitete i uređaje koje je teško obezbediti primenom postojećih tehnologija. Buduća mreža može biti ili nova mreža (odnosno, unapređena verzija postojeće), ili heterogeni skup novih

mreža (odnosno, novih i postojećih mreža) koji funkcioniše kao jedna mreža [ITU11b]. Neki zahtevi (na primer, promovisanje ravnopravne konkurencije) koji predstavljaju odraz razvoja društva, ostaju važni i u konceptu budućih mreža [ITU04a]. Istovremeno, javljaju se novi zahtevi i izazovi. Pojava Internet stvari (*Internet of Things*, IoT) i računarstva u oblaku, kao i implementacija novih optičkih tehnologija predstavljaju faktore koji nameću nove zahteve za mreže. Postavlja se pitanje da li današnje arhitekture mreža mogu da zadovolje ove buduće zahteve.

Postoji više ciljeva budućih mreža u pogledu zadovoljavanja novih zahteva, koji nisu smatrani primarnim ili nisu u dovoljnoj meri realizovani u današnjim mrežama. Ti ciljevi oslikavaju osnove karakteristike budućih mreža, a to su:

- unapređenje servisa: buduće mreže treba da obezbede brojne nove servise koji su prilagođeni zahtevima korisnika, bez značajnog rasta kapitalnih i operativnih troškova;
- efikasan pristup podacima: buduće mreže treba da imaju arhitekturu koja može da podrži razmenu ogromnih količina podataka u distribuiranom okruženju, kao i da omoguće brz, jednostavan, bezbedan i precizan pristup podacima, nezavisno od lokacije korisnika;
- zaštita životne sredine: arhitektura i način funkcionisanja budućih mreža treba da minimizira potrošnju energije i emisije štetnih gasova;
- podrška ekonomskom i društvenom razvoju: buduće mreže treba da podstiču ulazak novih učesnika na tržište telekomunikacija, razvoj konkurencije i razvoj univerzalnih servisa.

Kako bi se ispunili prethodno navedeni ciljevi, arhitektura budućih mreža treba da zadovolji određene zahteve. Važno je napomenuti da konkretna buduća mreža ne mora ispuniti sve ciljeve. Koji zahtevi će biti implementirani u kojoj arhitekturi zavisi od dugoročnih ciljeva. Na Slici 2.1 su prikazane relacije između najznačajnijih ciljeva budućih mreža i zahteva koje arhitektura budućih mreža treba da zadovolji. Neki zahtevi, kao što su upravljanje mrežom, mobilnost, identifikacija, pouzdanost i bezbednost, mogu pokrivati više ciljeva.



Slika 2.1 Osnovni ciljevi i zahtevi arhitekture budućih mreža

Buduće mreže treba da podrže diverzifikaciju servisa i povezivanje ogromnog broja različitih uređaja (na primer, senzora i terminalnih uređaja). Takođe, buduće mreže treba da se odlikuju funkcionalnom fleksibilnošću i mogućnošću dinamičkih modifikacija u cilju obezbeđivanja budućih servisa. Jedna arhitektura treba da podrži koegzistenciju različitih servisa, bez degradacije performansi pri obezbeđivanju određenih servisa usled modifikacije drugih servisa.

Vrlo važna karakteristika budućih mreža jeste virtuelizacija resursa koja omogućava kreiranje particija resursa, pri čemu se jedan segment resursa može istovremeno deliti na više virtuelnih resursa. Omogućena je i izolacija bilo kog virtuelnog resursa od ostalih. Buduće mreže treba da podrže i apstrakciju. Na taj način, određeni virtuelni resurs ne mora direktno odgovarati svojim fizičkim karakteristikama. S obzirom na to da više virtuelnih mreža može istovremeno koegzistirati, različite virtuelne mreže mogu primenjivati različite tehnologije bez međusobnog uticaja, čime se postiže bolje iskorišćenje fizičkih resursa.

Optimalno i efikasno upravljanje ogromnim količinama podataka je dodatni zahtev koji buduće mreže treba da podrže. Karakteristike saobraćaja u budućim mrežama najviše će zavisiti od lokacije podataka, a manje od geografskog razmeštaja korisnika. Pojavom računarstva u oblaku i daljim razvojem informaciono-komunikacionih tehnologija raste značaj *data* centara, o čemu će biti više reči u nastavku poglavlja.

Buduće mreže treba da koriste tehnologije koje će unaprediti energetske efikasnost na nivou uređaja, opreme i mreže. Potrošnja energije, pored drugih fizičkih ograničenja (kao što su ograničeni kapaciteti mreže), može postati ograničavajući faktor i potencijalno sprečiti dalji razvoj servisa. Uz to, zahtevani propusni opseg raste sa obezbeđivanjem novih servisa i aplikacija. Stoga, unapređenje energetske efikasnosti na nivou uređaja, opreme i mreže, uz minimizaciju nepotrebnog saobraćaja, predstavlja osnovni načini uštede energije u budućim mrežama.

Zahtev koji se postavlja pred buduće mreže jeste i podrška razvoja informaciono-komunikacionih tehnologija u različitim oblastima, urbanim i ruralnim područjima u razvijenim zemljama i zemljama u razvoju. Postojeće okruženje još uvek postavlja određene prepreke učesnicima u procesu obezbeđivanja servisa, sadržaja i aplikacija. U tom smislu, cilj budućih mreža je podrška obezbeđivanju univerzalnih servisa kroz razvoj globalnih standarda i izgradnju jednostavnih arhitektura. Na osnovu toga, moguće je smanjiti troškove izgradnje i implementacije, operativne troškove, kao i smanjiti digitalnu poddelu.

U kontekstu budućih mreža, posebnu pažnju treba posvetiti ekonomskim i društvenim aspektima, kao što su ekonomski podsticaji za razvoj i implementaciju arhitekture i razvoj protokola u budućim mrežama. Osnovni cilj ovih podsticaja je obezbeđivanje održivog, konkurentnog okruženja budućih mreža.

Takođe, buduće mreže treba da zadovolje zahteve u pogledu mogućnosti obrade ogromnih količina podataka koje će se zatim efikasno i efektivno transformisati u relevantne informacije za učesnike. Preporuka je i da buduće mreže treba da obezbede servise mobilnih mreža nezavisno od svojstava mobilnosti čvorova mreže. Optimizacija kapaciteta uz analizu različitih fizičkih ograničenja mreže predstavlja dodatni zahtev za

buduće mreže. U tom kontekstu, zahtev za buduće mreže je i obezbeđivanje novih struktura za identifikaciju koja može efikasno podržati skalabilnost, mobilnost i pristup podacima. Uz sve prethodno navedeno, buduće mreže moraju zadovoljiti zahteve u pogledu bezbednosti, omogućiti kontrolu pristupa na više nivoa, i uopšteno, stvoriti povoljno okruženje za sve učesnike.

2.3. Pokretači razvoja okruženja budućeg Interneta

Neki od glavnih pokretača razvoja okruženja budućeg Interneta su značajan rast obima saobraćaja, razvoj bežičnih i optičkih komunikacionih sistema i pojava računarstva u oblaku [Mat14]. U ovoj doktorskoj disertaciji, poseban akcenat je na analizi značaja računarstva u oblaku i unapređenja u oblasti optičkih mreža, konkretno elastičnih optičkih mreža.

2.3.1. Rast obima Internet saobraćaja

Razvoj Interneta pratilo je niz promena. Rast obima Internet saobraćaja ogleda se u rastu broja krajnjih korisnika i rastu obima Internet saobraćaja po krajnjem korisniku. Primera radi, 1992. godine, Internet je opsluživao približno 100 GB dnevno. Deset godina kasnije, 2002. godine, ukupni Internet saobraćaj je iznosio oko 100 GB po sekundi. 2017. godine, ukupni Internet saobraćaj je dostigao 45 000 GB po sekundi. Sličan scenario važi i za Internet saobraćaj po korisniku. Tako je 2000. godine, Internet saobraćaj po korisniku bio 10 MB na mesečnom nivou; 2007. godine Internet saobraćaj po korisniku bio je značajno niže od 1 GB na mesečnom nivou, a već 2017. godine iznosio je 13 GB po korisniku. Prognozira se da će do 2022. godine Internet saobraćaj na globalnom nivou porasti na 44 GB po korisniku [Cis19].

Regionalni razvoj Interneta ide u korak sa globalnim razvojem. Nešto manji rast koji je poslednjih godina primetan u Evropi i Americi može se objasniti činjenicom da su područja koja su najranije krenula sa ekspanzijom Interneta. Prognozirani rast obima

saobraćaja (izražen u %) i prognozirani ukupan obim Internet saobraćaja na mesečnom nivou, za period od 2017. godine do 2022. godine, prikazan je u Tabeli 2.1 [Cis19].

Tabela 2.1 Prognozirani rast obima Internet saobraćaja (2017-2022. godina) [Cis19]

| Region | Rast obima Internet saobraćaja (%) | Ukupni obim Internet saobraćaja (EB) |
|----------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| Srednji Istok i Afrika | 41 | 20,9 |
| Azija | 32 | 172,7 |
| Centralna i Istočna Evropa | 26 | 25,3 |
| Zapadna Evropa | 22 | 49,9 |
| Severna Amerika | 21 | 108,4 |
| Južna Amerika | 21 | 18,8 |

U početnoj fazi razvoja, najzastupljeniji način pristupa Internetu bio je iz fiksnih mreža. Razvojem mobilnih uređaja i bežičnih komunikacionih tehnologija, značajno se povećao broj krajnjih korisnika koji imaju mogućnost pristupa Internetu. Procenjuje se da će na globalnom nivou, obim Internet saobraćaja u mobilnim mrežama do 2022. godine dostići 77.5 EB mesečno, odnosno, imaće godišnju stopu rasta od 46% u odnosu na 2017. godinu [Cis19]. Takođe se procenjuje da će obim Internet saobraćaja u fiksnim mrežama do 2022. godine zabeležiti rast od 24% u odnosu na 2017. godinu [Cis19].

Rast obima saobraćaja po krajnjem korisniku, nije podstaknut samo rastom broja krajnjih korisnika koji imaju mogućnost pristupa Internetu, već prevashodno promenom samog Internet saobraćaja. U ranim fazama razvoja Interneta, komunikacija je najčešće bila asinhrona, pa kašnjenje nije bilo od najvećeg značaja (na primer, pri prenosu elektronske pošte). Vremenom, zahtevi u pogledu propusnog opsega i kašnjenja postajali su sve stroži. Pored toga, obim saobraćaja se gotovo udvostručavao na svake dve godine. Prema poslednjim merenjima, rast Internet saobraćaja primarno potiče od prenosa *streaming* saobraćaja u realnom vremenu. Time razvoj Interneta ide od platforme za prenos podataka ka platformi za prenos različitih sadržaja, pre svega video sadržaja, zahtevnih u pogledu propusnog opsega. Obezbeđivanje sadržaja i aplikacija u realnom vremenu čini najveći udeo u Internet saobraćaju, u bilo kom posmatranom periodu dana. Sve to utiče na rast tražnje za propusnim opsegom po svakom krajnjem korisniku, a zahtevi za smanjenje kašnjenja i gubitka paketa su rigorozniji. Prenos video

sadržaja u 2017. godini činio je 75% od ukupnog Internet saobraćaja. Prema prognozama za period od 2017. godine do 2022. godine, prenos video sadržaja u 2022. godini činiće 82% od ukupnog Internet saobraćaja, sa godišnjim rastom od 29% u odnosu na 2017. godinu [Cis19].

2.3.2. Računarstvo u oblaku

Prema ITU, računarstvo u oblaku (*Cloud Computing*) predstavlja paradigmu za obezbeđivanje pristupa skalabilnom i elastičnom skupu deljivih, fizičkih ili virtualnih resursa sa mogućnošću obezbeđivanja servisa i njihovo administriranje na zahtev [ITU14] U nastavku disertacije biće korišćen termin *Cloud Computing*. *National Institute of Standards and Technology* (NIST) definiše *Cloud Computing* kao model za obezbeđivanje odgovarajućeg, potpunog pristupa skupu deljenih, konfigurabilnih resursa (mreža, servera, skladišnih kapaciteta, aplikacija i servisa) na zahtev, pri čemu se obezbeđivanje tih resursa vrši uz minimalno angažovanje i minimalnu interakciju sa provajderom [NIS11]. Učesnici u *Cloud Computing*-u su *cloud* provajderi, *cloud* partneri i korisnici *cloud* servisa. Korisnici *cloud* servisa sklapaju poslovne relacije sa *cloud* partnerom ili *cloud* provajderom u cilju korišćenja *cloud* servisa. *Cloud* partner (na primer, *cloud* broker ili *cloud* revizor) obezbeđuje podršku aktivnostima *cloud* provajdera, korisnika, ili i jedno i drugo. *Cloud* provajderi obezbeđuju *cloud* servise. Pored te osnovne uloge, *cloud* provajderi obavljaju nadzor i održavanje *cloud* resursa.

Osnovna karakteristika *Cloud Computing*-a je da korisnici mogu unilateralno pristupati *cloud* resursima na zahtev, bez neophodne interakcije sa svakim provajderom. Resursi su dostupni na osnovu pristupa mreži standardnim mehanizmima. Takođe, resurse je moguće deliti većem broju korisnika, pri čemu se različiti fizički i virtuelni resursi dinamički dodeljuju u zavisnosti od potreba korisnika. Postoji i neki vid nezavisnosti obezbeđivanja resursa od lokacije korisnika, s obzirom da korisnik, u opštem slučaju, nema kontrolu ili saznanja o tome s koje lokacije tačno se vrši obezbeđivanje resursa, ali može definisati lokaciju na višem nivou apstrakcije (na primer, na nivou države). Obezbeđivanje resursa je sa aspekta korisnika - beskonačno, a obim obezbeđivanja

resursa može se prilagoditi u bilo kom trenutku. Takođe, pristup *cloud* resursima može se meriti, nadgledati, kontrolisati i tarifirati.

Postoje tri osnovne funkcionalnosti koje obezbeđuju *cloud* provajderi, a koje se odlikuju minimalnim međusobnim podudaranjem [Mik16a]:

- aplikacije (korisnik pristupa aplikacijama koje obezbeđuje *cloud* provajder),
- infrastruktura (korisnik ima pravo pristupa resursima za obradu i skladištenje podataka ili resursima mreže) i
- platforma (korisnik može pristupati i upravljati aplikacijama korišćenjem jednog ili više programskih jezika i jednog ili više izvršnih okruženja koje obezbeđuje *cloud* provajder).

U direktnoj vezi sa funkcionalnostima su kategorije *cloud* servisa. Kategorija *cloud* servisa predstavlja grupu *cloud* servisa koja poseduje neki zajednički skup karakteristika i može uključivati jednu ili više vrsta funkcionalnosti [Mik16a]. Prema [ITU14], postoje sledeće kategorije *cloud* servisa: Komunikacija kao servis (*Communication as a Service*, CaaS), računarstvo kao servis (*Compute as a Service*, CompaaS), skladištenje podataka kao servis (*Data Storage as a Service*, DSaaS), infrastruktura kao servis (*Infrastructure as a Service*, IaaS), mreža kao servis (*Network as a Service*, NaaS), platforma kao servis (*Platform as a Service*, PaaS) i softver kao servis (*Software as a Service*, SaaS). Sistematičan prikaz ovih kategorija servisa i zavisnost od funkcionalnosti koje podržavaju dat je u Tabeli 2.2.

Tabela 2.2 Kategorije *cloud* servisa i vrste *cloud* funkcionalnosti [Mik16a]

| Kategorija cloud service | Vrsta funkcionalnosti | | |
|--------------------------|-----------------------|-----------|------------|
| | Infrastruktura | Platforma | Aplikacije |
| CompaaS | X | | |
| CaaS | | X | X |
| DSaaS | X | X | X |
| IaaS | X | | |
| NaaS | X | X | X |
| PaaS | | X | |
| SaaS | | | X |

CaaS je kategorija *cloud* servisa u kojoj se korisnicima kao funkcionalnost obezbeđuje interakcija u realnom vremenu. CompaaS korisnicima obezbeđuje pristup i korišćenje računarskih resursa neophodnih za izvršavanje aplikacija. DSaaS predstavlja kategoriju *cloud* servisa koja podrazumeva obezbeđivanje resursa i pripadajućih funkcionalnosti za skladištenje podataka. IaaS je kategorija *cloud* servisa u kojoj se kao funkcionalnost obezbeđuje *cloud* infrastruktura. NaaS korisnicima obezbeđuje povezanost i pripadajuće mrežne funkcionalnosti. PaaS je kategorija *cloud* servisa u kojoj je funkcionalnost koja se obezbeđuje korisnicima platformskog tipa. Konačno, SaaS korisnicima obezbeđuje aplikacijske funkcionalnosti.

U zavisnosti od organizacije, kontrole i deljenja fizičkih i virtuelnih resursa *cloud* provajdera razlikuju se sledeći modeli implementacije [Mik16a] *Cloud Computing*-a: javni, privatni, zajednički i hibridni. Javni *cloud* je model implementacije koji podrazumeva da je *cloud* servise moguće obezbediti bilo kojem korisniku, pri čemu resurse kontroliše *cloud* provajder. Može biti u vlasništvu, odnosno, njime se može upravljati i može se eksploatisati od strane poslovne, akademske ili državne organizacije, ili njihove kombinacije. Javno *cloud* okruženje je takvo da korisnici imaju malo, ili nemaju nikakva ograničenja. Nasuprot tome, privatni *cloud* je takav model implementacije u kome se *cloud* servisi obezbeđuju na osnovu ekskluzivnog prava jednom korisniku koji je ujedno zadužen i za kontrolu resursa. Može biti u vlasništvu, odnosno, njime se može upravljati i može se eksploatisati od strane jedne organizacije, ili treće strane. Korisnici mogu ovlastiti druge učesnike kako bi im omogućili pristup i time uvećali svoju dobit. U ovom modelu implementacije postoje stroga ograničenja korisnika. Zajednički *cloud* podrazumeva da se *cloud* servisi obezbeđuju na ekskluzivnoj osnovi i mogu se deliti određenom skupu korisnika koji imaju iste zahteve i međusobno su povezani, pri čemu se resursi kontrolišu od strane najmanje jednog člana skupa. Može biti u vlasništvu, odnosno, njime se može upravljati i može se eksploatisati od strane jedne ili više organizacija, treće strane, ili njihove kombinacije. Ograničenja za korisnike su manje restriktivna u odnosu na privatni *cloud*. Hibridni *cloud* podrazumeva primenu najmanje dva od prethodno opisanih modela implementacije. Implementirani modeli ostaju jedinstveni entiteti. Može biti u vlasništvu, odnosno, njime se može upravljati i može se eksploatisati od strane date

organizacije ili treće strane. Ograničenja su definisana samim modelima koji učestvuju u formiranju hibridnog *cloud*-a.

Od velike je važnosti uočiti razliku šta jeste *cloud*, a šta nije. *Cloud Computing* se zasniva na *data* centrima za skladištenje i obezbeđivanje servisa. Pojam *data* centar predstavlja skup umreženih računarskih servera koji obezbeđuju skladištenje, obradu ili distribuciju velikih količina podataka. Današnji *data* centri sastoje se iz nekoliko stotina hiljada servera, povezanih *switch*-evima, ruterima i linkovima velikih kapaciteta [Ham14]. Međutim, samo korišćenje *data* centra, ne znači nužno da se radi o *Cloud Computing*-u. *Data* centri koji ne obezbeđuju veliku elastičnost i skalabilnost, pristup bilo kada i bilo gde, obezbeđivanje servisa na zahtev uz mogućnost merenja i mogućnost korišćenja od strane više korisnika, ne smatraju se *cloud*-om. Takođe, *Cloud Computing* se fundamentalno razlikuje od *hosting/outsourcing*-a. *Hosting/outsourcing* omogućava obezbeđivanje računarskih i softverskih resursa neke organizacije izvan sopstvenih *data* centara. Na taj način se upravljanje informaciono-komunikacionom infrastrukturom poverava trećoj strani. Međutim, ovo ne znači nužno da treća strana obezbeđuje svoje servise u formi *cloud*-a. Na primer, ukoliko posmatrana organizacija zahteva pristup dodatnim resursima tokom perioda vršnog opterećenja u slučaju *hosting/outsourcing*-a, pristup tim resursima neće biti omogućen na zahtev bez intervencija treće strane. Takođe, *hosting/outsourcing* vrlo često ne podrazumeva da se računarski i skladišni kapaciteti obezbeđuju većem broju korisnika. Uz to, *cloud* provajder obezbeđuje svoje resurse i servise svim korisnicima pod istim uslovima, dok *hosting/outsourcing* podrazumeva sklapanje odgovarajućih ugovora i obezbeđivanje različitih servisa za svakog korisnika [ITU17].

Prognozira se da će obim Internet saobraćaja koji će se opsluživati preko *cloud*-a do kraja 2021. godine iznositi 19,5 ZB (1,6 ZB po mesecu) [Cis18]. Ako se ima u vidu da je 2016. godine ukupan Internet saobraćaj opslužen preko *cloud*-a iznosio 6,0 ZB, može se uočiti da je prognozirana godišnja stopa rasta obima Internet saobraćaja opsluženog preko *cloud*-a 27%. Takođe, prognozira se da će obim Internet saobraćaja koji se opslužuje preko *cloud*-a do 2021. godine činiti 95% ukupnog saobraćaja opsluženog iz *data* centara. Istovremeno, očekuje se da do 2021. godine skladišni kapaciteti *data*

centara porastu na 2,6 ZB (poređenja radi, prosečan kapacitet data centara 2016. godine iznosio je 663 EB) [Cis18].

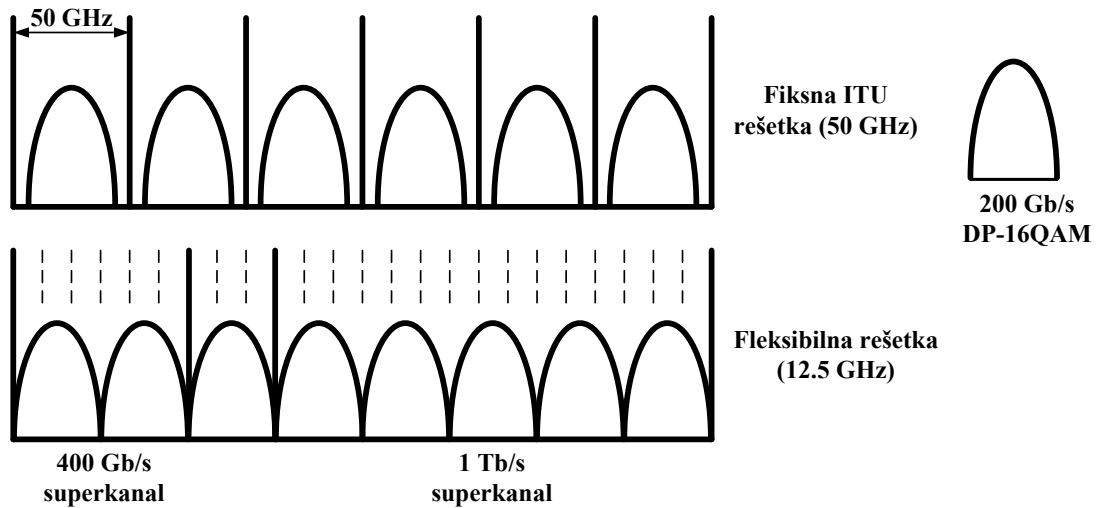
2.3.3. *Elastične optičke mreže*

Poslednjih godina, istraživanja u oblasti optičkih komunikacionih sistema dovela su do značajnih pomaka, koji se najviše ogledaju u razvoju spektralno efikasnih modulacionih tehnika, optičkih komponenti i novih arhitektura optičkih mreža - elastičnih optičkih mreža [Cli13]. S obzirom na to da se prognozira dalji rast obima Internet saobraćaja, dalji razvoj *Cloud Computing*-a, ali i rast tražnje za pristupom servisima, sadržajima i aplikacijama zahtevnim u pogledu propusnog opsega, neophodno je obezbediti dovoljne kapacitete transportnih mreža koje će moći da podrže prognozirane pravce razvoja.

Optička vlakna imaju brojne prednosti u odnosu na druge medijume za prenos. Najznačajnija prednost je to što omogućavaju ostvarivanje značajno većih propusnih opsega na dužim rastojanjima, zahvaljujući manjim gubicima i velikom broju kanala koji se istovremeno mogu uspostaviti u raspoloživom spektru. U optičkom vlaknu, opseg od 1,3 μm do 1,6 μm koristi se za prenos podataka. U okviru toga, C opseg (talasne dužine od 1525 nm (frekvencija 195,9 THz) do 1565 nm (frekvencija 191,5 THz)) ostvaruje prenos sa najnižim gubicima na rastojanjima od nekoliko desetina do nekoliko stotina km. Tehnika gustog multipleksiranja po talasnim dužinama (*Dense Wavelength Division Multiplexing*, DWDM) omogućava uspostavljanje velikog broja optičkih kanala koristeći različite talasne dužine na jednom optičkom vlaknu. Kako bi se iskoristio ceo raspoloživi C opseg, ITU-T je u preporuci ITU-T G.694.1 definisao tabelu sa skupom svih talasnih dužina (i odgovarajućih frekvencija) [ITU12]. DWDM talasne dužine su inicijalno bile podešene na razmaku od 100 GHz (oko 0,8 nm). Da bi se odgovorilo na rastuće zahteve za opsluživanjem sve većih obima saobraćaja, najpre je povećan broj raspoloživih kanala, tako što je razmak između kanala podešen na 50 GHz (oko 0,4 nm). Na taj način, moguće je ostvariti 80 kanala. Pored toga, kapacitet kanala je uvećan primenom optoelektričnih uređaja koji rade na većim protocima a u

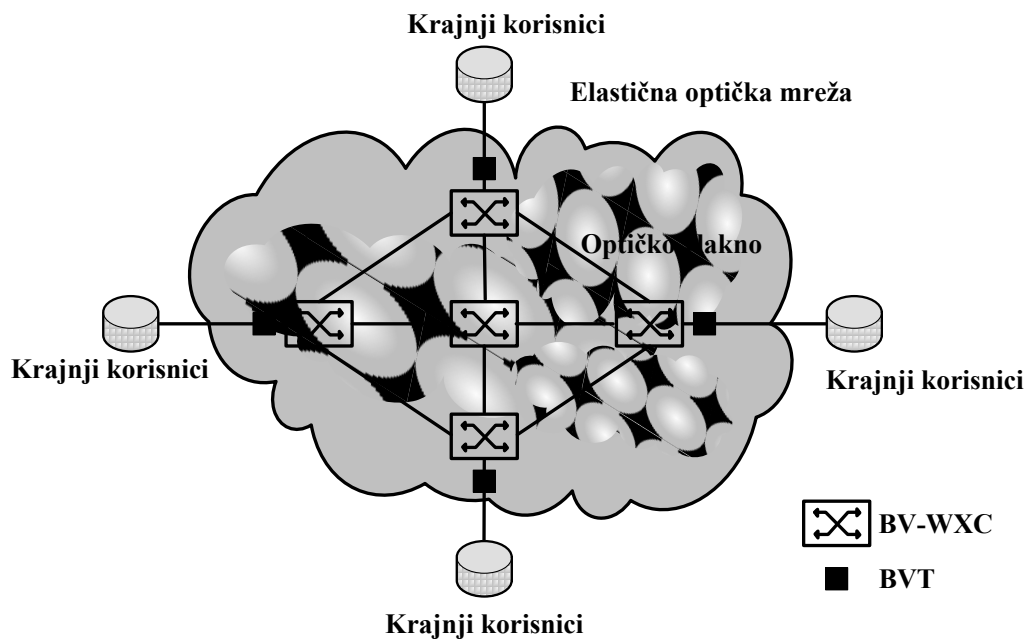
okviru rešetke od 50 GHz. Protok je time uvećan od početnih 2,5 Gb/s na 100 Gb/s po talasnoj dužini, a ostvarena je spektralna efikasnost od 2 bit/s/Hz.

Povećanje protoka preko 100 Gb/s po jednom kanalu zahteva veće formate kvadraturne amplitudske modulacije (*Quadrature Amplitude Modulation*, QAM). Na primer, 16-QAM povećava protok 2 puta (na 200 Gb/s) u odnosu na kvadraturnu faznu modulaciju, (*Quadrature Phase Shift Keying*, QPSK) [Lor16]. Međutim, veći formati QAM modulacije ostvaruju prenos na kraćim rastojanjima. Jedan od načina da se poveća kapacitet kanala na 400 Gb/s ili 1 Tb/s je primena više podnosilaca. Na primer, 400 Gb/s moguće je postići sa dva 16-QAM modulisana podnosioca na 37,5 GHz (200 Gb/s po svakom, ukupno 75 GHz); 1 Tb/s moguće je ostvariti sa četiri 32-QAM podnosioca (svaki na 43,75 GHz, ukupno 175 GHz). Ovi primeri ukazuju na potrebu za većim razmacima između kanala, čime se narušava standardna rešetka od 50 GHz po kanalu. Dakle, postalo je neophodno standardizovati rešetku koja obezbeđuje najbolju spektralnu efikasnost za različite zahteve u pogledu potrebnog spektra (na primer, kanal od 100 Gb/s na 37,5 GHz i 400 Gb/s na 75 GHz). Kako bi se prevazišao taj izazov, od strane ITU-T je definisana finija podela spektra, tzv. fleksibilna rešetka (*flex-grid*) [ITU12]. Fleksibilna rešetka omogućava alokaciju proizvoljnog broja (n) slotova fiksne širine u zavisnosti od potreba. Širina slota od 12,5 GHz omogućava prenos 100 Gb/s po kanalu, dok je razmak između kanala 37,5 GHz ($n = 3$), umesto 50 GHz, što je slučaj sa fiksnom rešetkom. Na Slici 2.2 prikazan je primer fleksibilne rešetke, koja može da podrži 8 kanala, ali po potrebi, može grupisati date kanale u superkanale.



Slika 2.2 Razlika između fiksne i fleksibilne rešetke

Elastične optičke mreže, ili *flex-grid* optičke mreže, omogućavaju fleksibilnu alokaciju spektra svakom putu svetlosti u zavisnosti od tražnje. Zbog svojih karakteristika, elastične optičke mreže smatraju se obećavajućim rešenjem transportne mreže u okruženju budućeg Interneta [Che18]. Na Slici 2.3, prikazana je ilustracija arhitekture elastične optičke mreže.



Slika 2.3 Arhitektura elastične optičke mreže

U arhitekturi elastičnih optičkih mreža, dve komponente su od najvećeg značaja: *Bandwidth Variable Transponder* (BVT) i *Bandwidth Variable Wavelength Cross-Connect* (BV-WXC) [Cli13]. Uloga BVT je da obezbede prenos podataka uz zauzeće spektra koje tačno odgovara zahtevima. Ovi transponderi mogu da prilagode propusni opseg dovoljno brzo, na osnovu promene modulacione tehnike a sve se dešava pod softverskom kontrolom, pa se zato često kaže da su oni deo softverski definisanih optičkih sistema [Lor16]. Osnovna prednost BVT je ta što se njihovom primenom smanjuje broj potrebnih transpondera koji rade na različitim propusnim opsezima. Na taj način, moguće je koristiti jedan tip transpondera koji može da radi na zahtevanim protocima, čime se ujedno smanjuju i troškovi. Druga značajna prednost BVT je da mogu ostvariti kompromis između rastojanja i spektralne efikasnosti. Primenom istog transpondera ostvaruje se vrlo efikasna upotreba raspoloživog spektra, bez potrebe za regeneratorima signala. BV-WXC omogućavaju uspostavljanje puta svetlosti kroz mrežu s kraja na kraj uz dodeljivanje dovoljnog propusnog opsega, definisanog u BVT [Cos16]. Kada BVT poveća protok, svaki BV-WXC na putu svetlosti mora prilagoditi svoj port, tako da može podržati različite protoke istog puta svetlosti.

Jedan od primarnih problema u elastičnim optičkim mrežama je problem rutiranja i alokacije spektra. Ovaj problem je poznat kao *Routing and Spectrum Allocation* (RSA) problem i odnosi se na određivanje odgovarajućeg puta svetlosti za dati par čvorova izvor - odredište, uz dodeljivanje odgovarajućeg dela spektra za dati put svetlosti. Pri rešavanju RSA problema, moraju se zadovoljiti ograničenja koja se odnose na susedstvo (*spectrum contiguity constraint*) i kontinuitet segmenata spektra (*spectrum continuity constraint*). Odnosno, dodeljeni spektar treba da se sastoji iz susednih segmenata spektra, čiji se kontinuitet mora održati na svim linkovima koji čine dati put svetlosti, bez preklapanja segmenata spektra. Takođe, dodeljeni spektar treba da odgovara tražnji, u cilju minimizacije iskorišćenja spektra [Ala16]. RSA problem može se proširiti na *Routing, Modulation, and Spectrum Allocation* (RMSA) problem uvođenjem koncepta adaptivnih modulacionih tehnika. RMSA algoritmi mogu rešiti problem transparentnog dometa, uz ostvarivanje značajnih ušteda u pogledu iskorišćenja spektra [Gos14a]. RSA problemi mogu se klasifikovati na statičke i dinamičke [Wan14]. Statički RSA problem javlja se tokom faze planiranja mreže, kada je tražnja unapred poznata. Moguće je

odrediti optimalna rešenja ili rešenja koja su bliska optimalnim u zavisnosti od saobraćajnih zahteva. Dinamički RSA problem nastaje u operativnoj fazi, kada tražnja nije unapred poznata. U poređenju sa statičkim, dinamički RSA problem je složeniji, dolazi do fragmentacije raspoloživog spektra, što povećava verovatnoću blokiranja u mreži i dovodi do nedovoljne iskorišćenosti spektra.

3. VERTIKALNA INTERKONEKCIJA I RELACIJE IZMEĐU UČESNIKA U BUDUĆEM INTERNETU

Delimično komplementarni i delimično suprotstavljeni interesi glavnih učesnika u Internet okruženju ubrzavaju razvoj Interneta. Različiti i potencijalno suprotstavljeni interesi mogu se uočiti u okviru svake grupe učesnika, na primer, između velikih i malih provajdera IS ili između velikih i malih provajdera SA. Podrazumeva se da se interesi razlikuju i između grupa učesnika, što oslikava konkurentske odnose u celom procesu obezbeđivanja sadržaja i aplikacija. Interesi učesnika su usmereni ka krajnjim korisnicima koji na osnovu svoje spremnosti da plate definisanu cenu najviše utiču na to da li će se ponuditi novi servisi, sadržaji ili aplikacije na tržištu. Različiti faktori doprinose razvoju novih servisa i dobiti provajdera i krajnjih korisnika. Ipak, preduslov za to je da relacije između učesnika nisu neprihvatljive sa aspekta regulative. Pronalaženje optimalnih relacija između učesnika zahteva inovacije zasnovane na novim modelima interkonekcije.

3.1. Pojmovi vertikalne interkonekcije i vertikalne integracije u mrežama budućeg Interneta

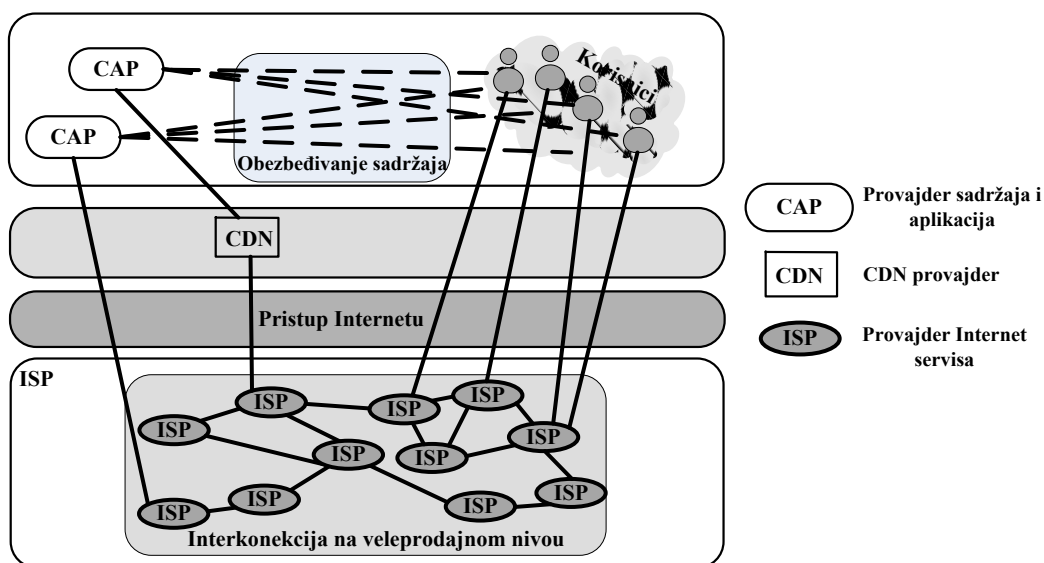
Liberalizacijom telekomunikacionog tržišta pitanje interkonekcije postaje jedno od ključnih pitanja za učesnike u oblasti telekomunikacija. Primarni cilj interkonekcije jeste omogućavanje komunikacije između korisnika različitih učesnika. Pored toga, interkonekcija između učesnika u oblasti telekomunikacija obezbeđuje povećanje profitabilnosti i unapređuje servise koji su od značaja za korisnike. Prema najčešće korišćenoj definiciji, koja se može naći u Direktivi Evropskog parlamenta o interkonekciji i pristupu, interkonekcija predstavlja fizičko i logičko povezivanje javnih komunikacionih mreža korišćenih od strane istih ili različitih učesnika, sa ciljem da se

korisnicima jednog učesnika omogućiti komunikaciju sa korisnicima drugog učesnika, ili da se omogućiti pristup servisima koje obezbeđuje drugi učesnik [Dir02]. Servisi mogu biti obezbeđeni od strane učesnika u interkonekciji, ili učesnika koji imaju pristup mreži. Pojam interkonekcije, u nekim slučajevima, može se poistovetiti sa pojmom pristupa [Dir02]. U skladu sa istom Direktivom, pristup označava dostupnost opreme i/ili servisa drugim učesnicima pod određenim uslovima, na ekskluzivnoj ili neekskluzivnoj osnovi, u cilju obezbeđivanja elektronskih komunikacionih servisa. Između ostalog, pristup obuhvata pristup elementima mreže i pripadajućoj infrastrukturi i opremi, pristup relevantnim softverskim sistemima, pristup fiksnim i mobilnim mrežama, pristup sistemima koji su neophodni za servise digitalne televizije, kao i pristup servisima virtuelne mreže.

U najširem smislu, interkonekcija može biti horizontalna i vertikalna. Horizontalna interkonekcija označava interkonekciju između učesnika koji su konkurenti i nadmeću se za iste korisnike na istom tržištu. Pod vertikalnom interkonekcijom podrazumeva se interkonekcija između učesnika koji se nalaze na različitim nivoima mreže. Primer vertikalne interkonekcije je interkonekcija između *long-distance* operatora i lokalnog operatora. Učesnici u vertikalnoj interkonekciji u budućem Internetu, u opštem slučaju, mogu biti: provajderi SA, provajderi IS, CDN provajderi i *cloud* provajderi. Uloga korisnika u Internet okruženju je značajna i u velikoj meri utiče na relacije između provajdera u mrežama budućeg Interneta. Relacije između učesnika prikazane su na Slici 3.1.

Isprekidane linije koje povezuju provajdere SA i korisnike ukazuju na to da i korisnici mogu obezbeđivati sadržaje. Provajderi IS obezbeđuju pristup provajderima SA i korisnicima. Interkonekcija na veleprodajnom nivou uspostavlja se u oblasti provajdera IS, kao što je prikazano na Slici 3.1.

Učesnici u procesu obezbeđivanja servisa, sadržaja ili aplikacija krajnjim korisnicima mogu imati interes u formiranju vertikalne integracije. Termin vertikalna integracija odnosi se na situaciju u kojoj jedan učesnik u procesu obezbeđivanja servisa, sadržaja ili aplikacija kontroliše više aktivnosti u tom procesu [Bla83].



Slika 3.1 Relacije između učesnika u procesu obezbeđivanja pristupa sadržaju

Vertikalno integrisan učesnik u procesu obezbeđivanja servisa, sadržaja ili aplikacija nije izložen duploj marginalizaciji. Dupla marginalizacija nastaje kada susedni učesnici u procesu obezbeđivanja servisa, sadržaja ili aplikacija, koji imaju monopolistički položaj na tržištu, smanjuju obim obezbeđivanja na monopolistički nivo, što dovodi do gubitaka. Takođe, vertikalno integrisani učesnici u procesu obezbeđivanja servisa, sadržaja ili aplikacija imaju bolju kontrolu ponude i tražnje. Drugim rečima, vertikalna integracija unapređuje efikasnost i pruža bolje mogućnosti za povećanje prihoda u procesu obezbeđivanja servisa, sadržaja ili aplikacija.

Tokom dvadesetog veka, vertikalna integracija je često bila zastupljena na tržištu telekomunikacija (na primer, u telefoniji), kada su operatori investirali u izgradnju infrastrukture i instalaciju opreme ali istovremeno i obezbeđivali prenos govornih signala ili *telex*-a. Ova pojava bila je praćena regulatornim merama, podsticala je konkurenciju i divergenciju telekomunikacionih servisa. Na primer, u Sjedinjenim Američkim Državama, regionalni operatori bili su separatisani od velikog operatora AT&T po pravilu iz 1984. Iste godine, *British Telecom* je privatizovan, što je dalo podsticaj razvoju konkurencije. Vertikalna integracija je cilj kojem teže mnogi učesnici na tržištu telekomunikacija. U nastavku su opisani neki najčešći primeri vertikalne integracije [Mai14].

Provajderi IS mogu predlagati pristup portalima sa vestima ili drugim aplikacijama, čime se krajnji korisnici podstiču da pristupaju njihovim servisima. U ovom kontekstu, konvergencija servisa može biti od značaja, pa tako provajderi IS mogu obezbeđivati i prenos televizijskih kanala (na primer, *Orange* u Francuskoj). U Velikoj Britaniji, *Vodafone* je preuzeo *Cable & Wireless Worldwide* za više od milijardu funti, na osnovu čega je koristio fiksnu mrežu za unapređenje svoje okosnice, ali i unapređenje obezbeđivanja servisa. Ovo je *Vodafone*-u obezbedilo bolji položaj na tržištu u odnosu na konkurentne provajdere IS. Provajderi koji se nalaze na različitim nivoima u procesu obezbeđivanja servisa, sadržaja ili aplikacija mogu spajati svoje oblasti poslovanja u cilju ostvarivanja bolje pozicije na tržištu. Primer toga je spajanje *AOL*-a (provajder Internet servisa) i *TimeWarner*-a (vodeće medijske kuće) u 2000. godini u Sjedinjenim Američkim Državama.

Google je jedan od najpoznatijih primera vertikalne integracije, s obzirom da je inicijalno bio usmeren na obezbeđivanje određenih servisa, a zatim je oblast delovanja proširena na širok spektar servisa. *Google* je započeo svoj rad kao pretraživač, 1998. godine, a prihode je obezbeđivao na osnovu oglašavanja reklama. Zatim je proširen spektar obezbeđivanja (besplatnih) servisa na servise elektronske pošte (*Gmail*), *Google Calendar*, *YouTube*, *Google News*, *Google Earth*, *Google Maps*, pretraživač (*Chrome*) i ponuđen je operativni sistem *Android*. Osnovni princip jeste inkorporirati alatke *Google* pretraživača u te servise, čime će se uvećati prihodi od oglašavanja reklama. Na taj način se ojačava konkurencija na datim nivoima u procesu obezbeđivanja servisa, sadržaja ili aplikacija, smanjuju se troškovi krajnjih korisnika, raste tražnja za obezbeđivanjem servisa, sadržaja ili aplikacija, što može dovesti do dodatnih prihoda od oglašavanja reklama. Od 2011. godine, *Google* poseduje više od 900 000 servera koji se koriste za pretraživače, ali i za obezbeđivanje *cloud* servisa. Pored toga, u cilju smanjenja troškova tranzita i dodatnog povećanja tražnje, *Google* je počeo sa eksploatacijom sopstvene optičke mreže i pokrenuo je besplatno obezbeđivanje širokopojasnog pristupa Internetu primenom bežičnih komunikacionih tehnologija za domaćinstva. Takođe, *Google* je preuzeo i proizvođača mobilnih uređaja, *Motorola*, u cilju proizvodnje pametnih telefona i *set-top box*-eva za televiziju.

Microsoft, koji je inicijalno obezbeđivao operativne sisteme, takođe je primenio vertikalnu integraciju. Tada je pitanje od velikog značaja bilo inkorporiranje njihovog pretraživača u operativni sistem. Ovo je pokrenulo brojne debate i skoro dovelo do raspada kompanije. *Microsoft* takođe komercijalno nudi i nezaobilazne softverske pakete, pretraživača *Bing* (kao konkurenciju *Google*-u i kao dodatni izvor prihoda od oglašavanja reklama), zatim *Xbox* konzolu za igrice, *Surface* tablete i druge uređaje.

Još jedan značajan primer vertikalne integracije je i *Apple*, koji obezbeđuje hardverske komponente (računare, *iPod*, *iPhone*, *iPad*) i softverske servise (ima sopstveni operativni sistem, *iTunes* i *Apple Store*).

Kao rezultat vertikalne integracije mogu nastati koncerni. Međutim, tu se može javiti potreba za regulatornim merama u cilju sprečavanja suviše integracije. Tipičan primer je prethodno pomenuta situacija sa *Microsoft*-om 2001. godine, koji krajnjim korisnicima nije ostavljao mogućnost izbora pretraživača. Ovo pitanje je bilo od velikog značaja, s obzirom da je *Microsoft* imao kvazi-monopolistički položaj u pogledu obezbeđivanja operativnog sistema. Samim tim, krajnji korisnici gotovo da nisu imali mogućnost izbora pretraživača. Slično pitanje se ponovo javilo pojavom operativnih sistema *Windows 7* i *Windows 8*, kada je pretraživač *Internet Explorer* inicijalno podešen kao podrazumevani pretraživač.

Primer nepoželjne vertikalne integracije je pokušaj *Bell*-a da preuzme *Astral Media* (TV mreža) 2012. godine. Nepoželjna vertikalna integracija nastaje kada preuzimanje drugog učesnika može dovesti do smanjenja konkurencije na tržištu. U navedenom primeru, *Bell* je na tržištu već figurisao kao najveći provajder Internet servisa, najveća telefonska kompanija, a obezbeđivao je i velike TV programske servise. Kada je nivo vertikalne integracije preveliki, u odsustvu razvijene konkurencije u svim nivoima procesa obezbeđivanja servisa, sadržaja ili aplikacija na tržištu, velika je verovatnoća da će integrisani učesnik favorizovati svoje servise u ostalim nivoima kako bi se oslabila konkurencija. Time se takođe sprečava i ulazak novih učesnika na tržište. Regulatorno telo u Kanadi je ovaj pokušaj sprečilo.

3.2. Učesnici u vertikalnoj interkonekciji u mrežama budućeg Interneta i njihove karakteristike

U mrežama budućeg Interneta uloge pojedinih učesnika mogu se preklapati. Tako provajderi SA i korisnici mogu figurisati i kao provajderi i kao korisnici. Provajderi IS kao provajderi mreže obezbeđuju mogućnost pristupa provajderima. U ovom kontekstu, razlikuju se krajnji korisnici koji nemaju mogućnost obezbeđivanja javnih komunikacionih mreža ili servisa. Termin "korisnik", odnosi se na fizička lica ili entitete koji u opštem slučaju predstavljaju rezidencijalne korisnike i primarno pristupaju sadržaju, ali imaju mogućnost i kreiranja sadržaja. U tom smislu, korisnicima je neophodno obezbediti pristup Internetu. Način na koji provajderi SA i korisnici pristupaju Internetu je isti, s obzirom da i provajderi SA i korisnici moraju imati obezbeđen *upstream* pristup preko provajdera IS. Jasno je da je u slučaju provajdera SA značajno veći *upstream* saobraćaj, dok je u slučaju korisnika značajno veći *downstream* saobraćaj, izuzev u situacijama obezbeđivanja *peer-to-peer* aplikacija. Takođe, neki provajderi IS su više usmereni na obezbeđivanje pristupa provajderima SA, za razliku od onih koji obezbeđuju pristup krajnjim korisnicima.

Internet okruženje sastoji se iz interkonektovanih mreža (autonomnih sistema) koje formiraju zajednički sloj mreže i omogućavaju razmenu Internet saobraćaja između krajnjih tačaka, odnosno, provajdera SA i korisnika. Razdvajanje mrežnog sloja i aplikacionog sloja je jedna od osnovnih karakteristika mreža zasnovanih na Internet protokolu i naziva se još *Over-The-Top* (OTT) obezbeđivanje servisa. To znači da je moguća interakcija između provajdera SA i korisnika na aplikacionom sloju, uključujući i obezbeđivanje aplikacija bez učešća provajdera mreže.

3.2.1. Provajderi sadržaja i aplikacija

Provajderi SA kreiraju sadržaje (na primer, veb stranice, blogove, pokretne i nepokretne slike, itd.) i aplikacije (na primer, pretraživači, aplikacije za slanje poruka, itd.), što je

ujedno njihova primarna funkcija. U cilju obezbeđivanja sadržaja krajnjim korisnicima, neophodno je obezbediti pristup, a u nekim slučajevima i *hosting* kapacitete. Ovi provajderi teže vertikalnoj integraciji, čime šire svoju oblast poslovanja. Mogu izgraditi sopstvene *hosting* kapacitete, izgraditi sopstvenu mrežnu infrastrukturu, ili samostalno obezbeđivati CDN servise. Odluka o tome da li investirati u te dodatne funkcije, predstavlja zapravo "*make or buy*" odluku. U slučaju velikih provajdera SA, dodatni troškovi za obezbeđivanje vertikalne integracije mogu biti ekonomski opravdani. Uz to, vertikalna integracija obezbeđuje mogućnost kontrole procesa obezbeđivanja sadržaja.

Obezbeđivanje sadržaja i aplikacija je besplatno ili se naplaćuje pristup korisnicima. Naplata pristupa sadržajima može biti nezavisna od mreže, što oslikava odvojenost sloja mreže i sloja aplikacije kao osnovne karakteristike Interneta, odnosno OTT. Naplata pristupa sadržajima i aplikacijama može se realizovati na maloprodajnom nivou (direktna naplata, naplata kroz pretplate), ili na veleprodajnom nivou (na primer, kroz naplatu oglašavanja kroz sadržaje). U opštem slučaju, provajderi sadržaja i aplikacija teže obezbeđivanju pouzdanog pristupa sadržajima iz minimalne troškove. *Upstream* i *hosting* kapaciteti se obezbeđuju od strane provajdera IS i/ili CDN provajdera. Najčešće se ne vrši direktno plaćanje provajderima IS koji obezbeđuju pristup korisnicima.

Primeri provajdera SA su: različite platforme za transakcije (na primer, *Amazon*, *eBay*), platforme za društvene mreže (na primer, *Facebook*), pretraživači (na primer, *Google*, *Bing*), časopisi (na primer, *The Times*; obezbeđivanje *online* verzije časopisa predstavlja dopunu ili u nekim ređim slučajevima zamenu za štampanu verziju; slično je i sa turističkim agencijama), servisi za zabavu (na primer, *YouTube*, *Dailymotion*), provajderi aplikacija (na primer, *Skype*), pristup video sadržajima na zahtev (na primer, *Netflix*), blogovi i nekomercijalni provajderi sadržaja (ovi učesnici su primarno krajnji korisnici koji mogu imati i funkciju kreiranja sadržaja).

Poslednjih godina, provajderi SA imaju tendenciju ostvarivanja veće kontrole nad procesom obezbeđivanja svojih sadržaja. Imajući u vidu kontinuirani rast tražnje za pristupom sadržajima, pre svega video sadržajima, veliki pritisak je na vodećim provajderima SA da ostvare što bolji iskustveni kvalitet krajnjih korisnika. U te svrhe, provajderi SA sprovode različite strategije, u zavisnosti od svojih strateških ciljeva na

tržištu i svojih kapaciteta. Veći provajderi SA teže vertikalnoj integraciji, kao načinu unapređenja iskustvenog kvaliteta uz redukciju troškova obezbeđivanja sadržaja [Art14].

Situacija u kojoj veliki provajder SA (na primer, *Google*) poseduje sopstvenu mrežu, ali i sklapa ugovore sa drugim provajderima, može se smatrati načinom smanjivanja troškova za obezbeđivanje *upstream* kapaciteta. To takođe unapređuje iskustveni kvalitet i smanjuje kašnjenje, s obzirom da se sadržaj obezbeđuje direktno, umesto prosleđivanjem preko jedne ili više tranzitnih mreža. Funkcije provajdera SA (stvaranje i skladištenje sadržaja i aplikacija, pretraživača, itd.) dovode do značajnog rasta Internet saobraćaja. Provajderi SA moraju ulagati u resurse za skladištenje i obezbeđivanje sadržaja do krajnjih korisnika. Kreiranje sadržaja pokazuje i tendenciju regionalizacije, s obzirom da se deo sadržaja kreira na obodima mreže, tačnije, od strane korisnika (na primer, blogovi) [Ber12].

Poslednjih godina, Internet saobraćaj se progresivno koncentriše ka ograničenom broju velikih učesnika u Internet okruženju (hipergiganti, kao što je *Ofcom*). Tu su i vodeći provajderi SA (na primer, *Google*, *Amazon*, *Netflix*), koji postaju glavni izvori saobraćaja na Internetu. Samo u prvoj polovini 2013. godine, *YouTube* i *Netflix* su generisali 50% od ukupnog *downstream* saobraćaja tokom perioda vršnog opterećenja u fiksnim mrežama Sjedinjenih Američkih Država, odnosno 30% u mobilnim mrežama. Pojava vodećih provajdera SA na globalnom nivou predstavlja najznačajniju promenu u Internet okruženju, i potencijalno može uticati na strateški položaj učesnika pri sklapanju ugovora. Vodeći provajderi SA mogu iskoristiti svoj položaj za ostvarivanje nižih jediničnih cena (po GB ili Mb/s) kako bi povećali obim saobraćaja. Ovi provajderi takođe mogu obezbeđivati razne ekskluzivne sadržaje i aplikacije, čime potencijalno mogu uticati na odluku krajnjih korisnika u pogledu izbora provajdera IS [Art14].

Provajderi IS mogu obezbeđivati resurse za skladištenje podataka provajderima SA, kao alternativno rešenje. Dodatni motivi za obezbeđivanje tih resursa su bezbednosni razlozi, s obzirom da provajderi IS na taj način ne moraju u svojoj mreži instalirati opremu i uređaje treće strane [Art14].

Ipak, još uvek ne postoje adekvatni ugovori o interkonekciji između učesnika u procesu obezbeđivanja sadržaja koji bi zadovoljili sve zahteve učesnika. U budućnosti se očekuje da će provajderi SA vršiti *multi-homing*, odnosno, pored sopstvenih resursa koristiće servise treće strane u cilju balansiranja neophodnih ulaganja u unapređivanje iskustvenog kvaliteta. Takva strategija treba da stvori robusno okruženje deljenih i dodeljenih resursa koje omogućava optimalnu skalabilnost, bezbednost, optimalnu raspodelu troškova i minimizaciju otkaza kroz obezbeđivanje redundantnosti [Art14].

3.2.2. *Provajderi Internet servisa*

U opštem slučaju, provajder IS obezbeđuje širokopojasni pristup Internetu i omogućava pristup na maloprodajnom nivou, kao i na veleprodajnom nivou kroz različite oblike interkonekcije. Provajderi IS obezbeđuju pristup različitim korisnicima, odnosno, krajnjim korisnicima i provajderima SA. Čest je slučaj da provajderi IS obezbeđuju i servise na osnovu obezbeđivanja širokopojasnog pristupa Internetu, čime postaju konkurenti OTT provajderima. Takođe, provajderi IS mogu obezbeđivati i sopstvene OTT sadržaje i aplikacije. Provajderi IS uspostavljaju ugovora o tranzitiranju saobraćaja i/ili *peering* ugovore kako bi obezbedili pristup Internetu i omogućili korisnicima pristup sadržajima koje obezbeđuje udaljeni provajder SA preko drugog provajdera IS. Obezbeđivanje pristupa korisnicima obuhvata prenos *upstream* i *downstream* saobraćaja kao glavnog izvora prihoda. Prihodi se mogu generisati i obezbeđivanjem pristupa i/ili *hosting* servisa provajderima SA. Neki provajderi IS mogu imati funkciju obezbeđivanja servisa tranzita drugim provajderima IS. U tom slučaju, njihova uloga je obezbeđivanje veleprodajnih servisa trećoj strani. Takođe, ovi provajderi IS mogu biti vertikalno integrisani, pa pored svoje primarne funkcije mogu obezbeđivati i pristup korisnicima.

Postoje dve vrste provajdera IS: provajderi koji poseduju mrežu i virtuelni provajderi IS koji ne poseduju sopstvenu infrastrukturu mreže ali mogu iznajmljivati mrežu konkurentnog operatora u cilju obezbeđivanja servisa svojim krajnjim korisnicima. Postojanje virtuelnih provajdera IS regulisano je od strane regulatornih tela. Tarifni

mehanizmi definisani od strane provajdera IS moraju biti prihvatljivi za krajnje korisnike, ali i takvi da obezbeđuju profit provajdera. Postoji više primenjenih tarifnih mehanizama, od kojih su najčešće primenjivani *flat-rate* (krajnji korisnici plaćaju pretplatu u okviru koje imaju pravo neograničenog korišćenja resursa mreže) i tarifiranje zasnovano na korišćenju resursa (krajnji korisnici plaćaju u zavisnosti od korišćenja resursa mreže). Važno je napomenuti da tarifni mehanizam ne obezbeđuje samo profit provajderima, već predstavlja i način kontrole obima saobraćaja u mreži, što se postiže porastom cena koje dovode do pada tražnje, kada je mreža preopterećena, i obratno, niže cene utiču na rast tražnje, u slučaju niskog korišćenja resursa mreže.

Provajderi IS mogu obezbeđivati i tranzitiranje saobraćaja između provajdera IS koji obezbeđuju pristup Internetu krajnjim korisnicima i/ili drugih tranzitnih provajdera IS. Ovi provajderi imaju hijerarhijsku organizaciju. Provajderi koji pripadaju prvom hijerarhijskom nivou međusobno sklapaju *peering* ugovore o interkonekciji. Više regionalnih provajdera IS koji pripadaju drugom hijerarhijskom nivou su korisnici provajdera prvog nivoa i međusobno sklapaju *peering* ugovore o interkonekciji, ali i ugovore o tranzitiranju saobraćaja sa drugim provajderima u cilju obezbeđivanja servisa udaljenijim korisnicima. Provajderi na najnižem hijerarhijskom nivou korisnici su provajdera drugog hijerarhijskog nivoa. Na kraju ovakve hijerarhijske strukture nalaze se krajnji korisnici. Provajderi SA mogu biti povezani i sa provajderima na najnižem hijerarhijskom nivou, ali najčešće su povezani sa provajderima IS na višim hijerarhijskim nivoima. Uloga provajdera IS na najvišem hijerarhijskom nivou je obezbeđivanje globalnog pristupa, dok su provajderi nižeg hijerarhijskog nivoa korisnici provajdera prethodnog višeg hijerarhijskog nivoa. Kao što je već naglašeno, provajderi IS na najvišem hijerarhijskom nivou najčešće sklapaju *peering* ugovore o interkonekciji. Na nižim hijerarhijskim nivoima najčešće se sklapaju ugovori o tranzitiranju saobraćaja zasnovani na ceni tranzita po obezbeđenom Mb/s na mesečnom nivou. Ovi ugovori o interkonekciji biće detaljnije opisani u nastavku ove disertacije.

3.2.3. CDN provajderi

CDN provajderi vrše agregaciju sadržaja koje obezbeđuje provajder SA. Osnovna uloga CDN-a je da približe sadržaj korisnicima. U opštem slučaju, CDN predstavlja sistem servera, postavljenih na granicama ili unutar mreže provajdera IS koji obezbeđuje pristup krajnjim korisnicima. Serveri su strateški postavljeni na različitim lokacijama kako bi se obezbedio pouzdan pristup sadržajima sa bilo koje lokacije na kojoj se nalaze korisnici sadržaja i aplikacija. Na taj način, CDN obezbeđuju bolje performanse kroz tehnike migracije sadržaja, čime se smanjuje verovatnoća odbijanja zahteva za pristup sadržajima. Skladišteni sadržaji su zaštićeni od neautorizovanih izmena. Zahtevi korisnika za pristup sadržajima se opslužuju sa njima najbližeg servera, čime se smanjuje kašnjenje i unapređuje iskustveni kvalitet.

Pored osnovnih funkcija, CDN može obezbeđivati i servise dodatne vrednosti. Različiti servisi koje obezbeđuje CDN mogu biti pogodni za različite vrste sadržaja. Pristup svakoj vrsti sadržaja odlikuje se različitim karakteristikama (na primer, vršnoj tražnji za pristup, *upstream* i *downstream* saobraćajem, potrebnim hardverskim i softverskim resursima) kojima CDN može obezbediti dodatnu vrednost.

CDN generišu prihode od obezbeđivanja CDN servisa provajderima SA. Ti servisi se često naplaćuju u zavisnosti od potrebnog propusnog opsega, ali mogući su i drugi mehanizmi naplate, kao što je naplata po broju pristupa. Obezbeđivanje servisa sa dodatnom vrednošću u nekim slučajevima može generisati više od polovine od ukupnih prihoda. U pogledu troškova, CDN moraju održavati sopstvene lokalne servere i plaćati troškove tranzitiranja saobraćaja, ili održavati sopstvenu infrastrukturu mreže.

Postoji veliki broj CDN provajdera sa različitim funkcijama, kao što su: CDN provajderi koji obavljaju samo svoju primarnu delatnost (na primer, *Akamai*, koji samo poseduje servere), CDN provajderi koji takođe poseduju infrastrukturu mreže (na primer, *Limelight*), CDN provajderi koji su ujedno i provajderi IS (na primer, *Level 3*, *AT&T*), CDN provajderi koji su ujedno i provajderi SA (na primer, *Google*, *Amazon* (*Cloudfront*)). Neki proizvođači opreme mogu imati i ulogu CDN provajdera, kao što su

Cisco, Juniper, Alcatel Lucent. Osim po svojim funkcijama, CDN provajderi mogu se razlikovati i po geografskoj teritoriji na kojoj obezbeđuju svoje servise. Tako, CDN provajderi mogu obezbeđivati servise na međunarodnom, nacionalnom ili regionalnom nivou.

Osnovna uloga prvih CDN provajdera bila je smanjenje zagušenja u mreži. Povećanje zahteva za obezbeđivanje sadržaja uticalo je na razvoj CDN. CDN obezbeđuje brojne prednosti. Skladištenjem sadržaja na lokacijama bliže krajnjim korisnicima smanjuje se kašnjenje, kao i rastojanje na kojem treba da se obezbeđuje sadržaj, a unapređuje se kvalitet. Stoga, provajderi SA koji koriste CDN servise poboljšavaju svoj položaj na tržištu u odnosu na konkurentne provajdere SA. CDN servisi takođe smanjuju troškove tranzitiranja saobraćaja i obim *peering* saobraćaja. Skladištenje sadržaja na lokacijama bližim krajnjim korisnicima omogućava da se sadržaj obezbeđuje samo jednom od provajdera sadržaja i aplikacija do CDN servera. U suprotnom, svaki zahtev korisnika za pristup datom sadržaju bi iziskivao obezbeđivanje sadržaja od provajdera SA do krajnjeg korisnika. Time se obezbeđivanje sadržaja vrši kraćim putanjama, od CDN servera do krajnjeg korisnika, čime se minimizira dužina putanja. Lokalno skladištenje sadržaja omogućava smanjivanje potrebnog međunarodnog tranzitiranja saobraćaja do terminirajuće mreže, čime se smanjuje verovatnoća zagušenja u mreži. U odsustvu CDN, svaki provajder SA mora definisati relacije sa više provajdera IS. Korišćenjem CDN servisa, jedan provajder SA može uspostaviti relacije samo sa jednim CDN provajderom, koji će zatim uspostaviti relacije sa više provajdera IS.

Različiti učesnici mogu obezbeđivati CDN servise. U fazi ranog razvoja CDN poslovnih modela, postojali su CDN provajderi koji su obavljali samo primarnu delatnost (na primer, *Akamai*). U novije vreme, CDN servise najčešće obezbeđuju vertikalno integrisani učesnici. To može biti provajder IS, ili provajder SA (na primer, *Google, Netflix*) koji nudi sopstvena CDN rešenja. Moguće je i da učesnici u Internet okruženju (kao što je *Amazon*) obezbeđuju CDN servise za treću stranu.

S obzirom da različiti učesnici mogu obezbeđivati CDN servise, ne postoji tendencija CDN provajdera da obezbeđuju sopstvenu mrežu. Kao što je već naglašeno, češća je situacija da se drugi provajderi vertikalno integrišu i samostalno obezbeđuju CDN

servise unutar svojih poslovnih modela ili obezbeđuju CDN servise drugim provajderima. Sa aspekta provajdera SA, odluka da li investirati u sopstvena CDN rešenja zavisi od njegove veličine. Globalnim provajderima SA je ekonomski opravdano investirati u sopstvene CDN resurse, dok manji provajderi SA češće pristupaju servisima obezbeđenim od treće strane kako bi imali prednosti od ekonomije obima. Ipak, u opštem slučaju, provajderi SA teže pristupanju CDN servisa od neutralnog CDN provajdera, tj. CDN provajdera koji ne obezbeđuje i sopstvene sadržaje. Takav CDN provajder je pouzdaniji, s obzirom da nema interes da diskriminiše sadržaje drugih provajdera SA, naspram sopstvenih [Ber12].

3.2.4. *Cloud provajderi*

Cloud provajder obezbeđuje resurse u obliku instanci, pri čemu svaka instanca predstavlja virtuelnu mašinu, *Virtual Machine* (VM) određenih hardverskih i softverskih karakteristika. Osnovno svojstvo *cloud* resursa je mogućnost virtuelizacije [Ven12], [Dev12], [Zha10]. Virtuelizacija resursa može se definisati kao skup tehnika koje vrše apstrakciju karakteristika fizičkih resursa (na primer, hardverskih platformi, operativnih sistema, kapaciteta za skladištenje podataka ili resursa mreže) i obezbeđuju virtuelne resurse [Cli13]. Tipičan primer virtuelizacije resursa su virtuelne mašine koje predstavljaju računarsko okruženje u kojem se operativni sistem ili program može instalirati i izvršavati. Dakle, softver koji se izvršava na virtuelnoj mašini odvojen je od pripadajućih hardverskih resursa. Na taj način, virtuelna mašina imitira fizičko računarsko okruženje koje se lako može kopirati i premestiti između servera. Virtuelizacija resursa omogućava jednostavno deljenje računarskih resursa u *data* centrima i dodeljivanje virtuelnih resursa za obezbeđivanje servisa, sadržaja i aplikacija na zahtev. Pored toga, virtuelizacija resursa unutar *cloud data* centara omogućava ekonomično iskorišćenje hardvera i obezbeđuje elastičnost, balansiranje opterećenja i ekonomiju obima. Na osnovu virtuelizacije resursa moguće je vršiti migraciju virtuelnih mašina na druge servere u cilju unapređenja performansi i prevencije otkaza. Migracija se može vršiti u okviru istog *data* centra, ili van posmatranog *data* centra. U slučaju migracije van posmatranog *data* centra, virtuelna mašina i pripadajući podaci moraju se

migrirati iz jednog *data* centra u drugi. Nakon migracije, saobraćaj koji je usmeren ka migriranim sistemima prenosi se do novog *data* centra. Takođe, relativno jednostavna migracija na osnovu virtuelizacije *cloud* resursa omogućava primenu *anycasting* algoritma rutiranja [Aib14a]. U slučaju primene ovog algoritma, jedan od krajnjih čvorova putanje fiksiran, a drugi krajnji čvor se bira iz skupa potencijalnih čvorova [Wal14]. Osnovni motiv za razvoj *anycasting* rutiranja je sve veća zastupljenost *Cloud Computing*-a i CDN-a. U ovim sistemima, pristup servisima, sadržajima i aplikacijama može se obezbediti iz više različitih *data* centara ili individualnih servera koji su geografski dislocirani po mreži. Korisnici im mogu pristupiti u zavisnosti od definisanih ciljeva, kao što su troškovi, ostvarivanje određenih performansi i održivost. Osnovna prednost *anycasting* algoritma rutiranja je ta da je sadržaj, u proseku, skladišten na *data* centru čija lokacija je bliža krajnjim korisnicima, čime je smanjeno i kašnjenje [Gos15].

Cloud i CDN smatraju se komplementarnim platformama. *Cloud* obezbeđuje praktično neograničen pristup resursima (za obradu i skladištenje podataka ili infrastrukturu mreže) putem globalno raspoređenih servera. Nasuprot tome, CDN omogućava optimizovano obezbeđivanje sadržaja od servera do krajnjih korisnika (opsluživanje jedan prema više). Kombinovanjem *cloud*-a i CDN-a formira se sveobuhvatni sistem koji zadovoljava zahteve za CDN i uz to je ekonomski održiv.

Arhitektura CDN-a, zasnovana na *cloud*-u (*cloud* CDN), obezbeđuje brojne prednosti [Wan15]:

- formira se elastična platforma koja omogućava jednostavno, dinamičko proširivanje kapaciteta;
- provajderi SA i CDN provajderi nemaju uvid u složenost infrastrukture;
- obezbeđuje se upravljanje performansama zasnovano na kvalitetu servisa i
- stvara se otvoreni standard u cilju iskorišćavanja mogućnosti *cloud*-a da prilagođava kapacitet tokom perioda visokog opterećenja.

Cloud CDN predstavlja fleksibilno rešenje koje provajderima SA omogućava alokaciju sadržaja na jedan ili više *cloud* servera, a u zavisnosti od oblasti pokrivenosti, troškova i

mera performansi. Zahvaljujući prednostima *cloud*-a, sadržaj se locira bliže korisniku u slučaju *cloud* CDN-a u odnosu na konvencionalne CDN.

3.2.5. Krajnji korisnici

Termin "krajnji korisnici" podrazumeva fizička i pravna lica koja imaju širokopojasni pristup Internetu i zahtevaju pristup sadržajima i aplikacijama koje obezbeđuju provajderi SA. Krajnji korisnici pristupaju besplatnim ili plaćenim sadržajima i servisima/aplikacijama, što se može obezbediti od strane OTT provajdera ili provajdera IS.

Moguće je preklapanje funkcija između krajnjih korisnika i provajdera SA. Učesnici koji imaju primarnu ulogu krajnjih korisnika mogu u određenim slučajevima imati ulogu provajdera SA i obezbeđivati servise, sadržaje ili aplikacije, kao što su *peer-to-peer* aplikacije, *YouTube* video sadržaji, blogovi, itd. Ovakve relacije mogu izmeniti odnos saobraćaja u *download*-u i *upload*-u.

Po pravilu, krajnji korisnici pristupaju servisima. Ipak, krajnji korisnici mogu generisati prihode tako što na osnovu obezbeđenog pristupa Internetu mogu učestvovati na različitim tržištima (na primer, prodaja na *eBay*-u). Pristup Internetu takođe omogućava poslovnim korisnicima prodaju proizvoda i usluga. Slično tome, državne institucije obezbeđuju servise na osnovu pristupa Internetu (e-uprava).

Različiti korisnici mogu obezbeđivati svoje servise OTT, s obzirom da je to obezbeđivanje nezavisno od funkcije pristupa koju obezbeđuju provajderi IS. Takvo obezbeđivanje servisa ne bi bilo moguće bez razdvajanja sloja mreže i sloja aplikacije.

Krajnji korisnici snose troškove za pristup Internetu preko svog provajdera IS. Ti troškovi obuhvataju prenos podataka kako u *downstream*-u, tako i u *upstream*-u. Tarifiranje se najčešće vrši primenom *flat* tarifa, međutim, mogući su i drugi načini tarifiranja (na primer, na osnovu maksimalnog iskorišćenog kapaciteta).

Primeri maloprodajnih krajnjih korisnika su privatna domaćinstva, dok u slučaju poslovnih korisnika to mogu biti različita mala, srednja ili velika preduzeća.

3.3. Ugovori o vertikalnoj interkonekciji između učesnika u budućem Internetu

Relacije između učesnika u vertikalnoj interkonekciji oslikavaju se kroz formalno sklopljene ugovore koji definišu sve tehničko-ekonomske aspekte vertikalne interkonekcije. Pitanje naplate interkonekcije i definisanje tarifa interkonekcije predstavlja vrlo značajno pitanje za sve učesnike u interkonekciji. Postoji više predloženih koncepata tarifiranja interkonekcije. Najčešće predlagani koncept je troškovni (*Cost Based*), koji predviđa da se tarife interkonekcije zasnivaju na stvarnim troškovima koji proizilaze iz uspostavljanja interkonekcije. Odgovarajućom analizom troškova, moguće je formirati tarife interkonekcije tako da se postigne povraćaj troškova učesnika u interkonekciji. Međutim, troškove interkonekcije vrlo je teško precizno identifikovati i meriti. U skladu sa smernicama koje se mogu naći u Direktivi Evropske Komisije, osnova za obračun troškova interkonekcije treba da budu trenutni troškovi [Dir09]. Trenutne troškove je teško odrediti a otežavajuća okolnost je ta da trenutni troškovi imaju različito značenje kod različitih učesnika. Koja metoda će se koristiti za procenu troškova interkonekcije zavisi od dostupnosti podataka o prognoziranom obimu saobraćaja, prognoziranom broju korisnika, infrastrukturi mreže, objektivnosti, vremena i finansijskih sredstava potrebnih za ovu procenu. Potpuno raspodeljeni troškovi (*Fully Distributed Costs*, FDC) je često primenjivan model za obračun troškova [ITU04b]. Ovaj model zasniva se na alokaciji troškova po servisima ili elementima mreže, u zavisnosti od relativnog iskorišćenja kapaciteta. Ovim pristupom analiziraju se već nastali troškovi postojećih servisa, a deo zajedničkih i grupnih troškova se alokira za svaki pojedinačni servis interkonekcije. Primena ovog modela je relativno jednostavna, imajući u vidu da se koriste dostupni podaci. Međutim, ovaj model ne uzima u obzir uticaj i primenu novih tehnologija. Najčešće primenjivan

pristup za obračun troškova interkonekcije zasniva se na izračunavanju dugoročnih inkrementalnih troškova (*Long Run Incremental Cost*, LRIC). Za izračunavanje ovih troškova koriste se dostupni podaci o servisima i troškovima opreme i uređaja. Primenom LRIC, vrši se modifikacija stvarnih troškova u zavisnosti od potencijalnih promena troškova u budućnosti. Postoji više predloženih modela za obračun troškova interkonekcije koji se zasnivaju na analizi inkrementalnih troškova, kao što su: model koji uključuje ukupne dugoročne inkrementalne troškove (*Total Service Long Run Incremental Cost*, TSLRIC), model zasnovan na ukupnim dugoročnim inkrementalnim troškovima elemenata mreže (*Total Element Long Run Incremental Cost*, TELRIC) i model budućih dugoročnih prosečnih inkrementalnih troškova (*Long Run Average Incremental Cost*, LRAIC). Svi modeli za obračun troškova koji se zasnivaju na analizi dugoročnih inkrementalnih troškova obuhvataju očekivane troškove u budućnosti koji nastaju usled promene u obimu saobraćaja, broju korisnika, cene uređaja i opreme itd.

S obzirom na to da je za modelovanje troškova interkonekcije neophodno imati uvid u vrednosti mnogih parametara koji, vrlo često, nisu poznati regulatornim telima, pa ni samim učesnicima, implementacija modela interkonekcije zasnovanih na obračunu troškova predstavlja izuzetno složen i praktično neostvariv cilj. Iz tog razloga, predloženo je više alternativnih koncepata interkonekcije, kao što su: koncept podele prihoda (*Revenue Sharing*), koncept podele troškova (*Cost Sharing*), koncept zasnovan na maloprodajnoj ceni (*Retail Minus*), koncept *Wholesale Price*, koncept zasnovan na vršnim cenama (*Price Cap*) i koncept bez naplate interkonekcije (*Bill and Keep*). U nastavku će biti prikazane osnovne karakteristike ovih modela interkonekcije.

3.3.1. Koncept Revenue Sharing

Koncept *Revenue Sharing* predstavlja koncept podele prihoda između učesnika u interkonekciji. Udeo u prihodima učesnika zavisi od konkretnog ugovora o interkonekciji. Ovaj model interkonekcije može dati isto rešenje kao i model zasnovan na troškovima u slučaju kada su troškovi približno jednaki prihodima od interkonekcije. Najznačajnija prednost ovog modela je relativna jednostavnost implementacije. Takođe,

moguće je postići rebalans prihoda učesnika u situacijama kada postoji neki vid distorzija maloprodajnih cena. Ipak, primenom ovog modela interkonekcije mogu se smanjiti podsticaji za rebalans maloprodajnih cena ili za ulazak novih učesnika na tržište.

3.3.2. *Koncept Cost Sharing*

Za razliku od *Revenue Sharing*-a koji definiše podelu prihoda, *Cost Sharing* model predstavlja podelu troškova koji proizilaze iz uspostavljanja interkonekcije između učesnika. U opštem slučaju, problem podele troškova podrazumeva odlučivanje o tome da li učesnici treba da uspostave interkonekciju i ukoliko treba - koji učesnici treba da imaju pristup i po kojoj ceni, poštujući pri tom uslov da sve naplate pokrivaju troškove [Dob17]. Najveći izazov je ostvariti pravičnu podelu troškova.

Vrlo često se koncepti *Cost Sharing* i *Revenue Sharing* modeluju primenom teorije igara [Bil10], [Has15]. U tom slučaju, učesnik bira strategiju (iz skupa mogućih strategija) koja obezbeđuje najmanji udeo u troškovima uz pretpostavku da zna izabrane strategije ostalih učesnika. Strategija dovodi do Neš ekvilibrijuma ukoliko nijedan učesnik ne može smanjiti svoj udeo u troškovima izborom bilo koje druge strategije. Neš ekvilibrijum predstavlja najpoznatiji koncept za određivanje rešenja u teoriji igara i podrazumeva da svaki učesnik igre bira najbolju strategiju, analizirajući sve moguće strategije svih ostalih učesnika igre. Ipak, Neš ekvilibrijum nije uvek moguće odrediti ili je za to potrebno značajno više poteza čak i ukoliko učesnici uvek biraju svoju najbolju strategiju, odnosno, biraju strategiju koja im obezbeđuje najmanji udeo u troškovima [Bil10].

3.3.3. *Koncept Retail Minus*

Retail Minus koncept, odnosno, koncept zasnovan na maloprodajnoj ceni, primenjuje se u regulisanju cena pristupa telekomunikacionoj mreži ili njenim delovima, u regulisanju cena terminiranja, kao i naplate interkonekcije. Za realizaciju ovog koncepta,

neophodno je poznavanje samo informacija o alokaciji maloprodajnih troškova relevantnog servisa, što ga čini značajno jednostavnijim od troškovnog koncepta naplate interkonekcije. Ovaj koncept definiše veleprodajne cene u zavisnosti od maloprodajnih, pri čemu veleprodajne cene ne zavise od troškova koji nastaju u procesu generisanja veleprodajnog servisa [Irg05]. Veleprodajne cene se izračunavaju tako što se od maloprodajne cene oduzmu maloprodajni troškovi, tzv. "minus". Pri izračunavanju veleprodajnih cena od ključnog značaja je adekvatno odrediti relevantnu maloprodajnu cenu i vrednost "minusa".

Pri definisanju maloprodajne cene, neophodno je uzeti u obzir sledeće:

- maloprodajna cena može se zasnivati na individualnom servisu ili grupi servisa,
- veleprodajni servis može i ne mora biti u direktnoj vezi sa maloprodajnim,
- popusti i promocije mogu se smatrati privremenim izgubljenim prihodima te stoga ne treba da imaju uticaj na formiranje veleprodajne cene.

Vrednost "minusa" može biti određena kao:

- apsolutna fiksna vrednost (na ovaj način sprečava se smanjenje margine dostupne drugim učesnicima, ali istovremeno, ne podstiče se konkurencija na tržištu),
- procentualna vrednost maloprodajne cene (u slučaju smanjenja maloprodajne cene može dovesti do neisplative veleprodajne cene),
- kombinacija fiksne monetarne vrednosti i fiksnog procenta (smanjen je pritisak na tržište, postiže se balans između fleksibilnosti i transparentnosti).

3.3.4. Koncept Price Cap

Price Cap predstavlja koncept tarifiranja interkonekcije na osnovu definisanja vršnih cena za jedan ili grupu servisa. Primenom ovog koncepta postiže se fleksibilnost u definisanju cena interkonekcije, sve dok su njihove vrednosti niže od vršne cene. Vršne cene se najčešće ne zasnivaju na analizi troškova određenih servisa. Iz tog razloga,

najveći izazov pri primeni ovog koncepta je određivanje početne vršne cene koja je najpribližnija troškovima. U slučaju postavljanja previsoke vršne cene pri tarifiranju interkonekcije, moguće je narušiti konkurentne odnose na tržištu [ITU04b].

Osnovne prednosti *Price Cap* koncepta u naplati interkonekcije su:

- fleksibilnost u određivanju cena,
- ograničava se rast cena, čime se štite konkurenti i krajnji korisnici,
- podstiče se unapređivanje efikasnosti učesnika u interkonekciji,
- ograničava se mogućnost unakrsnog subvencionisanja.

3.3.5. *Koncept Wholesale Price*

Wholesale Price ugovori definišu jedinične veleprodajne cene za obezbeđivanje servisa koji nisu mogući bez uspostavljanja interkonekcije. Ova vrsta ugovora je dosta istraživana, najviše u domenu lanaca snabdevanja u raznim granama industrije. Osnovna prednost *Wholesale Price* ugovora je jednostavnost implementacije i administriranja [Lu17]. Takođe, ne postoji nikakvo ograničenje u pogledu veze između veleprodajne i maloprodajne cene [Lu17]. Može se smatrati da je veleprodajna cena donja granica maloprodajne cene i ukazuje na konkurentnost učesnika u interkonekciji [Son10]. Neke studije pokazuju da *Wholesale Price* ugovori ne podstiču učesnike na maksimizaciju profita [Fan18], [Cac03].

3.3.6. *Koncept Bill and Keep*

Bill and Keep koncept podrazumeva da nema naplate interkonekcije, odnosno, svaki učesnik u interkonekciji naplaćuje svojim krajnjim korisnicima odlazni saobraćaj, čime generiše prihode. Iz tog razloga se ovaj koncept u literaturi može naći i pod nazivom *Sender Keeps All* [ITU04b]. Ovakav koncept se primenjuje u slučaju kada je saobraćaj između učesnika u interkonekciji simetričan. Na taj način se izbegavaju i administrativni troškovi naplate interkonekcije. Da bi primena koncepta *Bill and Keep*

bila adekvatna, neophodno je vršiti kontinualno merenje obima saobraćaja i troškova. U slučaju značajne promene obima saobraćaja i narušavanja simetričnosti, neophodno je preći na neki od koncepata naplate interkonekcije.

3.4. Relacije između provajdera sadržaja i aplikacija i provajdera Internet servisa

Provajderi u Internet okruženju moraju jasno definisati svoje relacije u cilju efikasnijeg obezbeđivanja servisa krajnjim korisnicima. Provajderi SA nemaju mogućnost obezbeđivanja sadržaja i aplikacija krajnjim korisnicima bez uspostavljene interkonekcije sa provajderima IS. Cilj tih relacija je povećanje tražnje za obezbeđivanjem sadržaja, a samim tim i uvećanje prihoda provajdera. Neprihvatanje sklapanja ugovora o interkonekciji sa provajderima SA potencijalno može imati negativne efekte na poslovanje provajdera IS. Čak i u situacijama kada se ugovori o interkonekciji sklapaju sa konkurentnim provajderima, interkonekcija između provajdera SA i provajdera IS neophodna je za efikasno poslovanje. Nekada je najčešći način tarifiranja uspostavljanja interkonekcije između provajdera SA i provajdera IS bio sličan tarifiranju na relaciji provajder IS - krajnji korisnici, primenom *flat-rate* tarifiranja. Ovakva naplata je nezavisna od potencijalnih eksternalija, pozitivnih u slučaju dodavanja vrednosti pri obezbeđivanju pristupa Internetu, odnosno negativnih u slučaju nastajanja zagušenja u mreži. Ipak, informacije o tome kako se definišu tarifni mehanizmi između provajdera SA i provajdera IS gotovo nikada nisu dostupne, s obzirom da se time otkrivaju vrlo značajne informacije konkurentnim provajderima. Kao što je već rečeno, provajderi IS najčešće definišu *flat-rate* tarifne mehanizme sa provajderima SA na jednoj strani i krajnjim korisnicima na drugoj strani. Relacije između samih provajdera IS mogu se definisati i u zavisnosti od obima saobraćaja. Na taj način definisane poslovne relacije mogu biti rizične za provajdere IS s obzirom da parametar obima saobraćaja nije obuhvaćen svim relacijama. Ukoliko parametar obima saobraćaja nije adekvatno procenjen, mogući su gubici za provajdere IS. Upravo je to

jedan od razloga zašto provajderi IS teže izmenama tarifnih mehanizama koje će adekvatnije obuhvatati eksternalije u mreži koje se javljaju usled promena u obimu saobraćaja.

3.5. Relacije između provajdera Internet servisa

Ugovori o interkonekciji između provajdera IS mogu se, u opštem slučaju, klasifikovati na *peering* i ugovore o tranzitiranju saobraćaja. Obe kategorije ugovora o interkonekciji su najčešće zasnovane na principu najboljeg pokušaja. Interkonekcija mreža budućeg Interneta fundamentalno se razlikuje od interkonekcije javnih telefonskih mreža zbog primenjene komutacije paketa. Saobraćaj od udaljenog provajdera SA, koji ima uspostavljen ugovor o interkonekciji sa određenim provajderom IS, prenosi se do zadatog provajdera IS na osnovu ustanovljenog ugovora o interkonekciji. Interkonekcija između mreža različitih provajdera može se definisati kroz različite ugovore: *peering*, ugovor o tranzitiranju, plaćeni *peering*, ili ugovore o delimičnom tranzitiranju saobraćaja itd [Ber12].

3.5.1. Ugovori o tranzitiranju

Bilateralni ugovor koji podrazumeva da provajder IS obezbeđuje pristup Internetu za *upstream* i *downstream* saobraćaj drugog provajdera IS ili krajnjeg korisnika, uz obavezu da obezbeđuje prenos podataka i za treću stranu predstavlja ugovor o tranzitiranju saobraćaja. Ova vrsta ugovora o interkonekciji je veleprodajni ugovor. Ideja ovog ugovora o interkonekciji je "naplati svom korisniku i plati svom *upstream* provajderu". Krajnji korisnik plaća provajderu IS obezbeđivanje pristupa Internetu. Sve dok postoji dovoljno razvijena konkurencija na maloprodajnom nivou, provajder IS ima interes da troškove ugovora o tranzitiranju održava niskim. Previsoki troškovi koji se prenose na krajnje korisnike potencijalno mogu dovesti do gubitka krajnjih korisnika. Za razliku od ugovora o tranzitiranju koji obezbeđuje potpuni pristup Internetu, ugovor

o parcijalnom tranzitiranju predstavlja ograničenu formu tranzitiranja kada provajder IS obezbeđuje pristup samo nekom delu globalnog Interneta, na primer, određenom regionu ili određenom podskupu autonomnih sistema - domena.

Plaćanje tranzitiranja najčešće se zasniva na vršnom kapacitetu izraženom u Mb/s. Tipično, maksimum zahtevanog propusnog opsega u oba smera određuje cenu za obezbeđivanje tranzitiranja saobraćaja. Međutim, ugovor o tranzitiranju sve više postaje veleprodajni ugovor u kojem smer prenosa podataka nema veliki značaj. Za potrebe naplate, nema potrebe razlikovati inicirajuću i terminirajuću stranu. Za potrebe definisanja iznosa za naplatu obezbeđivanja tranzitiranja saobraćaja, često se primenjuje 95. percentil za merenje obima opsluženog saobraćaja. Primenom ovog merenja, vrši se odabiranje obima realizovanog saobraćaja u određenim vremenskim intervalima (na primer, na svakih 5 minuta). Po isteku obračunskog perioda (najčešće mesec dana), odbirci saobraćaja se rangiraju po obimu, 5 % vršnog saobraćaja se ne razmatra a naplata se vrši za 95 %. Odluka o uspostavljanju *peering* ili ugovora o tranzitiranju nosi i oportunitetni trošak [Ber12]. U ukupnim troškovima najveći udeo imaju varijabilni troškovi u slučaju tranzitiranja, odnosno fiksni troškovi u slučaju *peering*-a.

3.5.2. *Peering* ugovori o interkonekciji

Peering je bilateralni ugovor između provajdera IS na osnovu kojih se omogućava prenos podataka i komunikacija njihovih krajnjih korisnika. Za ovakvu vrstu ugovora o interkonekciji je karakteristično da najčešće nema naplate za opsluženi saobraćaj. *Peering* podrazumeva uzajamno obezbeđivanje pristupa korisnicima datih provajdera. Stoga, za razliku od tranzitiranja, *peering* ne obezbeđuje potpuni pristup Internetu. Drugim rečima: ako provajder A sklapa *peering* ugovor o interkonekciji sa provajderom B, i provajder B sklapa *peering* ugovor o interkonekciji sa provajderom C, tada provajder A ima pristup samo korisnicima provajdera B, ali ne i korisnicima provajdera C.

Peering ugovori o interkonekciji u opštem slučaju mogu se klasifikovati u skladu sa nivoom spremnosti za sklapanje novih *peering* ugovora i to na sledeći način: otvoreni

peering (moguće je uspostaviti *peering* ugovore sa bilo kojim provajderom), selektivni *peering* (*peering* ugovori se sklapaju uz dodatne zahteve) i restriktivni *peering* (nema tendencije za sklapanjem novih *peering* ugovora izuzev već uspostavljenih). U nekim slučajevima, provajderi ne uspostavljaju *peering* ugovore [Ber12].

Pri uspostavljanju *peering* ugovora o interkonekciji neophodno je razmotriti sledeće:

- definisati odnos odlaznog i dolaznog saobraćaja - najčešće je upravo taj odnos jedan od nekoliko ključnih faktora kada provajderi donose odluku o tome da li sklapati *peering* ugovore o interkonekciji sa drugim provajderima;
- odrediti obim saobraćaja i/ili neophodne kapacitete (da bi se sklopio *peering* ugovor o interkonekciji, u nekim slučajevima zahteva se određeni obim saobraćaja koji često zavisi od veličine mreže, odnosno, može se zahtevati određeni minimum kapaciteta linkova potencijalnog *peering* provajdera),
- geografsku oblast koju pokriva provajder (ovo je često relevantan zahtev, s obzirom da je u direktnoj vezi sa ulaganjima u infrastrukturu datog provajdera). Tada mreža u kojoj je iniciran saobraćaj prosleđuje ga što pre moguće drugoj mreži, i obrnuto. Stoga, ako provajder X sa manjom mrežom (po veličini) predaje saobraćaj provajderu Y sa većom mrežom, provajder Y će opsluživati saobraćaj na većem rastojanju. U tom slučaju, provajder Y ima više troškove za opsluživanje saobraćaja u odnosu na provajdera X. To znači da provajder X zapravo besplatno koristi infrastrukturu mreže provajdera Y. Iz tog razloga, veći provajderi uglavnom ne sklapaju *peering* ugovore o interkonekciji, ili zahtevaju da *peering* provajder preuzme opsluživanje saobraćaja u unapred definisanim tačkama interkonekcije. U praksi, provajderi ne zahtevaju samo izbalansirane tokove saobraćaja. Umesto toga, naročito u slučaju velikih provajdera, zahteva se izbalansiranost i saobraćaja i rastojanja, s obzirom da troškovi provajdera zavise od opsluženog saobraćaja, kao i od rastojanja na kojem se dati saobraćaj opslužuje.
- geografske zahteve, s obzirom da se saobraćaj često opslužuje kroz različite lokacije jedne ili različitih država. Ovaj zahtev ima za cilj izbalansiranu raspodelu saobraćaja i pomaže da se lokalni saobraćaj opslužuje u istom regionu.

- pitanja marketinga (provajder X neće težiti sklapanju *peering* ugovora o interkonekciji sa provajderom Y ukoliko postoji mogućnost da provajder X obezbeđuje tranzitiranje saobraćaja provajderu Y; takođe, provajder X neće težiti sklapanju *peering* ugovora o interkonekciji sa provajderom Y ukoliko postoji mogućnost da provajder Y ostvaruje veće koristi od *peering* ugovora).
- druge aspekte, kao što su broj korisnika, određeni zahtevi u pogledu obezbeđivanja servisa ili broj potrebnih IP adresa, koji ne moraju direktno uticati na troškove izgradnje infrastrukture mreže. Ovi zahtevi imaju osnovni cilj dovoljno opsluživanje saobraćaja koje će opravdati nastale troškove.

Odluka o sklapanju *peering* ugovora o interkonekciji zavisi i od toga da li provajder Internet servisa obezbeđuje i skladištenje sadržaja koji su od značaja za krajnje korisnike drugog provajdera. S jedne strane, provajder IS ima za cilj obezbeđivanje pristupa sadržaju. Međutim, to može dovesti do neizbalansiranih tokova saobraćaja. U opštem slučaju, ako su politike provajdera u pogledu sklapanja *peering* ugovora kompatibilne, podrazumeva se da oba učesnika u interkonekciji imaju slične dobiti od *peering*-a.

Čak i kada je ustanovljen *peering* ugovor o interkonekciji bez međusobne naplate, provajderi snose određene troškove. Odluka o sklapanju *peering*, odnosno ugovora o tranzitiranju mora biti ekonomski opravdana. Troškovi koji se javljaju pri *peering*-u su: troškovi za opsluživanje saobraćaja do tačke interkonekcije, troškovi opreme, troškovi utrošene električne energije itd. Pored toga, postoje i troškovi za uspostavljanje i nadgledanje *peering* relacija između provajdera. Imajući u vidu strukturu troškova *peering* ugovora o interkonekciji, potrebno je da obim opsluženog saobraćaja bude dovoljno veliki tako da jedinični troškovi budu niži u odnosu na iste u slučaju ugovora o tranzitiranju.

Ukoliko provajderi sklope ugovor o interkonekciji tako da nema naplate za uspostavljanje interkonekcije, takav ugovor se može posmatrati kao način uštede troškova za tačnu procenu i naplatu opsluženog saobraćaja. U nekim slučajevima, provajderi IS imaju podsticaj za sklapanje *peering* ugovora o interkonekciji u cilju smanjenja troškova tranzitiranja. Direktno prosleđivanje saobraćaja sa provajderom IS

koji je spreman da sklopi *peering* ugovor o interkonekciji dovodi do toga da nema troškova tranzitiranja, kojeg bi u suprotnom bilo neophodno uspostaviti sa nekim drugim provajderom. Takođe, provajderi mogu preferirati *peering* ugovor o interkonekciji, s obzirom da takav ugovor doprinosi unapređenju performansi. Na taj način, smanjuje se kašnjenje u mreži jer nema potrebe za tranzitnim rutiranjem saobraćaja preko provajdera koji obezbeđuju tranzitiranje. Pored toga, provajder IS ima bolju kontrolu nad rutiranjem i performansama u mreži. Na ovaj način, ukoliko algoritmi rutiranja preferiraju putanju na kojoj se ostvaruju loše performanse, moguće je konfigurisati alternativnu putanju. Za razliku od ugovora o tranzitiranju koji se bazira na provajder - korisnik relaciji, *peering* se karakteriše simetričnim relacijama. To znači da dva provajdera sklapaju *peering* ugovor o interkonekciji ako oba provajdera očekuju da imaju veću dobit od sklapanja ugovora u odnosu na situaciju bez takvog ugovora. U skladu s tim, ovakav ugovor o interkonekciji je Pareto optimalan za učesnike, što znači da nijedan učesnik ne može poboljšati svoj položaj u pregovaranju, a da se istovremeno ne pogorša položaj drugog učesnika.

Provajderi IS koji ispunjavaju zahteve za *peering* mogu birati između sklapanja *peering* ili ugovora o tranzitiranju, te stoga imaju mogućnost supstitucije ove dve vrste ugovora o interkonekciji. Odluka o uspostavljanju tih ugovora u najvećoj meri zavisi od planiranja mreže i optimizacije troškova. Ugovor o tranzitiranju podrazumeva troškove za opsluživanje saobraćaja, ali smanjuje troškove ulaganja u infrastrukturu sopstvene mreže. Samim tim, manji su operativni troškovi uz istovremeno obezbeđivanje zadovoljavajućih mera performansi. U praktičnim realizacijama, provajderi najčešće uspostavljaju i *peering* i ugovore o tranzitiranju, tj. ovi ugovori mogu biti komplementarni. Provajderi koji ne ispunjavaju zahteve za uspostavljanje *peering*-a, moraju uspostavljati ugovore o tranzitiranju saobraćaja. U tom smislu, ugovor o tranzitiranju se može posmatrati kao podrazumevani ugovor o interkonekciji. *Peering* tržište smatra se, u manjoj ili većoj meri, konkurentnim sve dok provajderi imaju mogućnost izbora provajdera koji obezbeđuje tranzitiranje saobraćaja.

3.5.3. Sekundarni/regionalni peering

U periodu ranog razvoja Interneta, kada je bio zastupljen manji broj provajdera, svi provajderi su međusobno sklapali *peering* ugovore o interkonekciji. Daljim rastom broja provajdera na tržištu, *peering* ugovori su sklapani uglavnom između provajdera u okosnici mreže. Sekundarni *peering* ugovori su sklapani između provajdera koji su na nižim nivoima mreže. Ukoliko korisnici dva različita provajdera razmenjuju sadržaje na *peer-to-peer* osnovi, ekonomski je isplativije obezbediti direktno opsluživanje saobraćaja umesto sklapanja ugovora o tranzitiranju saobraćaja. Na taj način, smanjuju se troškovi tranzitiranja saobraćaja i smanjuje se kašnjenje u mreži. Na primer, *Google* je u periodu izgradnje sopstvene mreže sklapao *peering* ugovore sa gotovo 2/3 provajdera. Oko 60 % saobraćaja je opsluženo primenom tranzitiranja [Ber12]. U praksi, manje ili regionalne mreže, ali i provajderi SA koji imaju sopstvenu infrastrukturu, međusobno direktno opslužuju saobraćaj. U tom slučaju postoji lanac uspostavljenih bilateralnih *peering* ugovora o interkonekciji. Provajderi koji sačinjavaju jedan takav lanac bilateralnih *peering* ugovora izbegavaju rutiranje saobraćaja preko provajdera na najvišem nivou mreže. Ovakva situacija može se smatrati posledicom činjenice da provajderi na najvišem hijerarhijskom nivou mreže tipično ne sklapaju *peering* ugovore sa drugim provajderima usled svoje restriktivne politike sklapanja ugovora o interkonekciji.

3.5.4. Plaćeni peering

Za razliku od ugovora bez naplate za opsluživanje saobraćaja, u slučaju plaćenog *peering*-a provajderi naplaćuju međusobno opsluživanje saobraćaja. Ipak, prosleđivanje saobraćaja je isto kao u slučaju ugovora bez naplate (isto važi i za ugovore o tranzitiranju). U praksi, plaćeni *peering* može se primeniti kada nesimetričnost opsluženog saobraćaja premaši određeni prag tolerancije. Takav slučaj se javio rastom tražnje za pristupom sadržajima, pre svega video sadržajima. Na primer, *YouTube* generiše, u proseku, 35 puta više *downlink* saobraćaja u odnosu na *uplink* saobraćaj. Dakle, značajno je više opsluženog saobraćaja na relaciji od provajdera SA ka

provajderu IS, nego suprotno [Ber12]. Međutim, opravdanost ugovora o plaćenom *peering*-u zavisi ne samo od simetričnosti saobraćaja, već i od rastojanja, kao i drugih faktora koji utiču na zahteve pri sklapanju ugovora (na primer, pozicije na tržištu).

3.5.5. Tačke interkonekcije u Internet okruženju

Tačka interkonekcije u Internet okruženju je mesto uspostavljanja višestrukih interkonekcija između provajdera. U datoj tački vrši se razmena saobraćaja. Provajderi su saglasni za uspostavljanje ugovora o interkonekciji u višestrukim tačkama u cilju prosleđivanja saobraćaja i smanjenja potrebe za sklapanjem ugovora o tranzitiranju, čime se smanjuju i troškovi. Učesnici u Internet okruženju uglavnom primenjuju takav model interkonekcije da većina provajdera teži razmeni saobraćaja sa drugim provajderima, snoseći troškove opsluživanja saobraćaja do tačke interkonekcije. Na taj način može se unaprediti i elastičnost mreže.

Tačke interkonekcije mogu predstavljati sledeće:

- tačku sklapanja multilateralnih *peering* ugovora o interkonekciji (javni *peering*),
- tačku sklapanja bilateralnih *peering* ugovora o interkonekciji (ti ugovori takođe mogu imati formu javnog *peering*-a),
- tačku sklapanja bilateralnih privatnih *peering* ugovora o interkonekciji (privatni *peering*) i
- tačku sklapanja ugovora o tranzitiranju.

Javni i privatni *peering* razlikuju se u sledećem: javni *peering* predstavlja interkonekciju nekoliko provajdera preko javnog Eternet komutatora. Ovakav vid realizacije interkonekcije je najviše zastupljen. Što je veći broj provajdera koji uspostavljaju interkonekciju u datoj tački interkonekcije i što je veći obim saobraćaja prosleđen u datoj tački, raste interesovanje ostalih provajdera za uspostavljanjem interkonekcije u posmatranoj tački. U slučaju privatnog *peering*-a, provajderi prosleđuju saobraćaj u tačkama interkonekcije preko dodeljenih uređaja za prospajanje. Pored osnovne funkcije

omogućavanja javnog i privatnog *peering*-a, tačke interkonekcije mogu obezbeđivati i dodatne servise i pružati podršku rutiranju saobraćaja [Ber12].

Ukoliko je nekoliko učesnika uključeno u bilaterarne *peering* ugovore, javljaju se značajni troškovi. U opštem slučaju, tačke interkonekcije generišu visoke fiksne, ali niske varijabilne troškove. Ukupni troškovi zavise od troškova opsluživanja saobraćaja do tačke interkonekcije (ovi troškovi se ne obračunavaju već naplaćuju na osnovu najvećeg raspoloživog kapaciteta), troškova opreme i troškova vezanih za obezbeđivanje *peering*-a u datoj tački interkonekcije (mesečni troškovi održavanja komutatora).

3.5.6. Faktori koji utiču na izbor ugovora o interkonekciji

Ugovori o interkonekciji bez međusobne naplate za opsluživanje saobraćaja predstavljaju mogući izbor samo u situacijama kada su troškovi i prednosti *peering* ugovora približno isti za sve učesnike. Ukoliko je razlika u obimu opsluženog saobraćaja mala, troškovi pregovaranja bi premašili potencijalnu dobit od definisanih cena [Bes13]. Pri donošenju odluke o sklapanju ugovora o interkonekciji, učesnici se oslanjaju na nekoliko kriterijuma. Ti kriterijumi, između ostalog, obuhvataju: odnos obima opsluženog saobraćaja učesnika, geografske karakteristike mreže drugog učesnika, minimalan broj tačaka interkonekcije i minimalan potreban kapacitet [Bes13]. Važno je napomenuti da u ugovorima o interkonekciji bez naplate u kojima učestvuju velike mreže često potrebno održavati odnos saobraćaja u određenim granicama. Na primer, meri se obim saobraćaja od mreže A do mreže B, kao i saobraćaj od mreže B do mreže A. Ukoliko ovi izmereni obimi saobraćaja nisu približno jednaki, ugovor o *peering*-u neće biti sklopljen. U ugovorima u kojima učestvuju velike mreže, potreban odnos obima saobraćaja je najčešće 2:1, ili 1,5:1 [Bes13].

Kriterijum odnosa obima saobraćaja ukazuje na to da li su troškovi i dobiti od sklapanja *peering* ugovora o interkonekciji približno jednaki za sve učesnike. Kada su troškovi i dobiti uporedivi, učesnici mogu proceniti da im je ekonomski isplativije da vrše jednostavnu razmenu saobraćaja, bez troškova bilateralnog pregovaranja. Značajna

asimetrija u saobraćaju utiče na to da troškovi i dobiti pri *peering* ugovorima nisu uporedivi između učesnika. U nekim slučajevima, iako *peering* ugovor obezbeđuje efikasnost, nije pogodno održavati sistem bez naplate. Umesto toga, moguće je preći na plaćeni *peering*. Ta plaćanja ne moraju u potpunosti odražavati odnos opsluženog saobraćaja između učesnika, pa *peering* ugovori bez naplate ipak mogu predstavljati zadovoljavajuće rešenje. Takva situacija može nastati kada, na primer, obim saobraćaja nije dovoljno veliki da opravda troškove nadzora i naplate saobraćaja. Pored odnosa opsluženog saobraćaja, i drugi parametri mogu biti relevantni za procenu dobiti od sklapanja ugovora. Ipak, u slučaju asimetričnog saobraćaja, pretpostavke koje idu u korist ugovora bez naplate opsluženog saobraćaja nisu validne jer troškovi nisu jednaki, te stoga ovi parametri ne mogu uticati na odluku.

Ugovori o interkonekciji u periodu ranog razvoja Interneta (tranzitiranje, *peering*) nisu bili predmet regulative. Uprkos uspešnom prilagođavanju Interneta na značajne promene u obimu i karakteristikama Internet saobraćaja, postoje predlozi da bi interkonekciju u Internet okruženju trebalo potpuno regulisati, kako u pogledu modela interkonekcije, tako i u pogledu cena. Regulatorne mere koje mogu ograničiti mogućnost fleksibilnog pregovaranja učesnika i uslove plaćanja, uključujući i uslove koji su tradicionalno bili bez naplate, imale bi negativne efekte iz više razloga. Najpre, uvođenje ograničenja na mogućnost slobodnog sklapanja ugovora koji uključuju plaćanja za opsluživanje saobraćaja potencijalno može dovesti do viših troškova, kao i viših cena za krajnje korisnike. U opštem slučaju, velika je verovatnoća da regulatorne mere mogu dovesti do neefikasnosti usled povećanja cena koje ne oslikavaju adekvatno troškove. Takođe, postojanje više konkurentnih alternativa za *peering* ugovore treba da olakša položaj svih učesnika.

Regulativa koja ograničava naplatu za opsluženi saobraćaj može ugroziti mogućnost minimizacije troškova. Takva regulacija cena postaje neefikasna onda kada su različiti troškovi pod kontrolom različitih učesnika. Mogućnost minimizacije ukupnih troškova postojaće samo ukoliko učesnici mogu potpuno fleksibilno definisati uslove naplate. Nedostatak podsticaja za minimizaciju ukupnih troškova najčešće vodi porastu cena za krajnje korisnike. Međutim, čak i kada troškovi ne rastu, cene koje plaćaju krajnji

korisnici će verovatno rasti jer većina učesnika u Internet okruženju zapravo povezuje dve strane tržišta. Na primer, provajder IS koji obezbeđuje pristup krajnjim korisnicima, ujedno obezbeđuje pristup i svim interkonektovanim mrežama u Internet okruženju. U skladu s tim, koristan princip za procenu efekata regulacije cena u *peering* ugovorima o interkonekciji je princip dvostranog tržišta. Na dvostranim tržištima, platforma koja povezuje različite strane može, u opštem slučaju, generisati prihode za svoje servise na različite načine. Na primer, provajderi IS koji obezbeđuju pristup krajnjim korisnicima mogu naplaćivati svoje servise samo krajnjim korisnicima, samo interkonektovanim provajderima SA koji nude sadržaje i aplikacije krajnjim korisnicima, ili i jednim i drugima. Na dvostranim tržištima, prihodi generisani sa jedne strane tržišta snižavaju troškove sa druge strane tržišta, što snižava i cene.

Pored viših troškova i viših cena, regulatorne mere mogu dovesti i do drugih značajnih pojava koje smanjuju efikasnost. Imajući u vidu prognoze za dalji rast Internet saobraćaja, javlja se potreba za sofisticiranim tarifnim mehanizmima koji bi uzimali u obzir i mogućnost zagušenja u mreži. Takve tarifne mehanizme bi bilo teško implementirati ukoliko su ugovori o interkonekciji strogo regulisani. Složenost određivanja relacije između troškova usled zagušenja i iskorišćenosti kapaciteta ukazuje na značaj naplate interkonekcije u jednom efikasnom sistemu. Da bi se bolje uvidela potreba za novim tarifnim sistemima koji analiziraju i moguća zagušenja, važno je uzeti u obzir to da trošak opsluživanja inkrementalne tražnje za pristup servisima, sadržajima ili aplikacijama nije konstantan i nije uvek predefinisano, već zavisi od zagušenja u interkonektovanim mrežama u bilo kom trenutku. Učesnici u Internet okruženju treba da imaju mogućnost izbora alternativnih tarifnih mehanizama koji mogu imati različite, međusobno povezane ciljeve, kao što su povraćaj investicija, izbegavanje složenih sistema naplate krajnjim korisnicima, povećanje iskorišćenosti kapaciteta i povećanja tražnje za pristupom Internetu. Teško je proceniti u kojoj meri bi učesnici, recimo provajderi SA, usvojili tarifiranje u zavisnosti od zagušenja u mreži. Ukoliko bi morali plaćati skuplje putanje sa mogućim zagušenjima, primenjivaće se rerutiranje saobraćaja na manje opterećene putanje. Provajderi SA bi se mogli prilagoditi takvim mehanizmima tarifiranja na osnovu novog načina definisanja ponuda krajnjim korisnicima. Neki od mogućih načina su sledeći: obezbeđivanje neograničenog pristupa

tokom perioda niskog opterećenja u mreži; *download* sadržaja tokom perioda niskog opterećenja u mreži (nasuprot obezbeđivanju sadržaja na zahtev); primena različitih mehanizama za smanjivanje obima saobraćaja; definisanje dodatne naplate za korisnike kojima se obezbeđuje pristup sadržajima tokom perioda visokog opterećenja u mreži itd. Iako je teško prognozirati efekte tarifnih mehanizama koji se baziraju na zagušenju u mreži, važno je da regulatorne mere ne sprečavaju mogućnost povraćaja troškova interkonekcije kako bi se omogućilo dalje ulaganje u razvoj i efikasnu iskorišćenost infrastrukture.

Regulacija cena *peering*-a bi zahtevala rešavanje više tehničkih izazova. Najpre, bilo bi potrebno definisati koje mreže i pod kojim uslovima bi morale sklapati ugovore o interkonekciji. S obzirom da učesnici u Internet okruženju mogu imati različite uloge, ove izazove je teško rešiti. Ovakve regulatorne mere bi značile da regulator mora učestvovati u rešavanju sporova u vezi sa tehničkim uslovima pod kojima se mreže interkonektuju. Troškovi usled interkonekcije, između ostalog, zavise od tačaka interkonekcije i rastojanja na kojima je potrebno opsluživati saobraćaj. Ukoliko jedan učesnik prosleđuje saobraćaj drugom učesniku u najbližoj tački interkonekcije, to znači da će drugi učesnik imati veće dodatne troškove zbog opsluživanja saobraćaja na većim rastojanjima. Iz tog razloga, ukoliko regulatorna tela nameću *peering* ugovore o interkonekciji bez naplate za opsluživanje saobraćaja, takođe moraju definisati u kojim fizičkim lokacijama se mora vršiti interkonekcija. To najviše zavisi od arhitekture mreža učesnika, lokacija krajnjih korisnika i drugih promenljivih faktora. Imajući u vidu dinamiku promena u Internet okruženju, kao i dinamiku promena u interkonekciji učesnika, ovakve regulatorne mere bi bile vrlo neefikasne. Pored prethodno navedenih izazova, regulatorna tela se suočavaju da dodatnim složenim pitanjima. Na primer, ukoliko bi jedan provajder SA preusmerio velike tokove saobraćaja u realnom vremenu, regulatorna tela bi morala definisati koje su obaveze provajdera IS kako bi se održao dovoljan kapacitet tačaka interkonekcije, uzimajući u obzir promene u Internet saobraćaju.

Postoje dva moguća pristupa za regulisanje *peering* ugovora o interkonekciji. Prvi pristup podrazumeva da najznačajnija pitanja ostaju nedefinisana od strane regulatora i

da se rešavaju od slučaja do slučaja. Takav pristup ne određuje unapred ni troškove interkonekcije, ni uslove pod kojima bi moglo doći do povraćaja tih troškova. Na taj način bi se smanjili podsticaji za ulaganja u unapređenje infrastrukture. Drugi pristup predviđa da regulator (bar teoretski) precizno definiše sve uslove. Time bi se onemogućile inovacije i fleksibilnije pregovaranje između učesnika [Bes13].

Regulacija cena interkonekcije može dovesti i do zloupotrebe regulatornih mera. Učesnici bi mogli primenjivati poslovne modele koji teže zloupotrebi ugovora o interkonekciji bez naplaćivanja za opsluživanje saobraćaja. Na primer, ukoliko je opsluživanje saobraćaja nekim putanjama besplatno, ili su cene niže od troškova, saobraćaj bi se preusmerio na te putanje, čak i u slučaju da one nisu najefikasnije za konkretne situacije. Stoga, rezultat regulatornih mera bi moglo biti preusmeravanje troškova od provajdera SA i drugih interkonektovanih mreža na provajdere IS i njihove krajnje korisnike.

3.6. Relacije između *cloud* provajdera i korisnika *cloud* servisa

Intenzivan razvoj i primena *Cloud Computing*-a zahteva dalji razvoj tarifnih mehanizama u ovom domenu. Različiti *cloud* provajderi različito su klasifikovali svoje tarifne mehanizme. Tako, na primer, *cloud* provajder *Amazon* primenjuje tarifiranje za: rezervisane instance, instance na zahtev i *Spot* instance, dok *Microsoft Azure* primenjuje *pay-as-you-go* i mesečne tarifne mehanizme [Mik16a]. Ulogu korisnika *cloud* servisa mogu imati provajderi u mrežama budućeg Interneta, ali i krajnji korisnici. Analiza relacija između *cloud* provajdera i korisnika *cloud* servisa biće opisana na primeru tarifnih mehanizama koje primenjuje *cloud* provajder *Amazon*, kao najzastupljeniji *cloud* provajder na tržištu.

Cena koju *cloud* provajderi definišu za pristup *cloud* resursima zavisi od tipa instance i primenjenog tarifnog mehanizma. U slučaju primene mehanizma tarifiranja na zahtev,

korisnici pristupaju *cloud* resursima na zahtev i plaćaju fiksni iznos po obračunskom intervalu bez obaveze sklapanja dugoročnih ugovora sa *cloud* provajderom. Tarifni mehanizam rezervacije odlikuje se naplaćivanjem pretplate za rezervaciju, uz uslov sklapanja ugovorne obaveze, najčešće na jednu godinu ili tri godine. S obzirom da mehanizam tarifiranja na zahtev i mehanizam rezervacije nemaju mogućnost izmene cene u zavisnosti od iskorišćenosti resursa, odnosno, odnosa ponude i tražnje, mogu se smatrati statičkim tarifnim mehanizmima.

Imajući u vidu činjenicu da tražnja za pristup resursima *cloud* provajdera nije uniformna tokom vremena, sve više se teži primeni dinamičkih oblika tarifiranja u cilju optimizacije prihoda. Definisanje cena u skladu sa realnim (ili prognoziranim) stanjem odnosa ponude i tražnje, korisnicima se mogu ponuditi neiskorišćeni resursi *cloud* provajdera. Pored toga, moguće je postići i izmeštanje perioda vršnog opterećenja. Kao rezultat, povećava se profit *cloud* provajdera, ali i dobit korisnika. Dinamički oblici tarifiranja mogu se realizovati kroz prikupljanje ponuda od korisnika, na osnovu čega se može vršiti alokacija resursa, a zatim i tarifiranje. Ovakvi tarifni mehanizmi sve više se koriste za alokaciju i tarifiranje neiskorišćenih resursa *cloud* provajdera. Adekvatno postavljeni mehanizmi aukcija mogu biti vrlo efikasno rešenje, s obzirom na to da se resursi alociraju korisnicima koji ih najviše vrednuju. Na taj način, stvaraju se uslovi za razvoj konkurencije između korisnika, a korisnici se podstiču da kreiraju ponude čije su vrednosti u skladu sa realnim vrednostima zahtevanih resursa [Too16].

Cloud provajder *Amazon* prvi je uveo dinamički tarifni mehanizam u decembru 2009. godine, pod nazivom *spot* tarifiranje. U slučaju primene ovog tarifnog mehanizma, cene za iznajmljivanje resursa - *spot* instanci, dinamički se određuju od strane *cloud* provajdera i zavise od raspoloživosti neiskorišćenih resursa, kao i ponude i tražnje za *spot* instancama. *spot* tarifiranje zasniva se na aukciji sa uniformnim određivanjem cena [Zha11].

Korisnici *cloud* resursa koji učestvuju u procesu aukcije kreiraju svoje ponude definisane na osnovu sledećih parametara:

- vrednosti ponude (maksimalne cene koju su spremni da plate po obračunskom intervalu za datu *spot* instancu),
- tipa instance,
- trajanja opsluživanja,
- geografskog područja koje se opslužuje.

Ponude je moguće kreirati u bilo kom trenutku, neograničen broj puta. Prikupljene ponude se sortiraju u opadajućem poretku u odnosu na njihove vrednosti, na osnovu čega *cloud* provajder alocira *spot* instance. Proces se nastavlja sve dok se ne alociraju svi raspoloživi resursi, ili dok se ne zadovolje svi zahtevi korisnika. *Spot* cena je jednaka najnižoj ponudi koja obezbeđuje pravo pristupa resursima. Svi korisnici koji dobijaju u procesu aukcije plaćaju istu cenu, nezavisno od vrednosti ponude. Korišćenje *spot* instanci je moguće sve dok je vrednost ponude viša od trenutno važeće *spot* cene.

Amazon je 2015. godine uveo novu verziju *spot* instanci - *spot block* instance. Osnovna karakteristika *spot block* instanci je mogućnost rada u kontinuitetu, bez terminiranja, u trajanju od 1 čas do 6 časova. Tarifiranje ovih instanci zasniva se na zahtevanom trajanju rada i dostupnosti resursa. Cene za korišćenje *spot block* instanci, *spot block* cene, najčešće su niže za 30% do 45% od cena *cloud* instanci na zahtev [Ama18a]. Kreiranjem ponude za učesće u nadmetanju za ostvarivanje pristupa *spot block* instancama u procesu aukcije, korisnik definiše maksimalnu cenu koju je spreman da plati po času korišćenja *spot block* instance i željeno vreme rada bez terminiranja. Ukoliko postoji dovoljno raspoloživih resursa za zahtevano trajanje rada bez terminiranja, *spot block* instanca biće inicirana, imaće mogućnost kontinuiranog rada bez terminiranja, a tarifiranje se vrši na osnovu fiksne cene po času. Po isteku definisanog vremena rada *spot block* instance, instanca biva terminirana od strane *cloud* provajdera. Ovaj model pristupa resursima *cloud* provajdera pogodan je za korisnike koji zahtevaju kontinuiran rad ograničenog trajanja, bez terminiranja.

3.7. Promene u interkonekciji između učesnika u budućem Internetu

Zajedno sa promenama u Internet okruženju odvijale su se promene u interkonekciji između učesnika, kao i u relacijama između učesnika u Internet okruženju. Kapacitet mreža je kontinualno unapređivan kako bi mogao da podrži konstantan rast obima Internet saobraćaja. Relacije između učesnika u Internet okruženju, definisane ugovorima o interkonekciji, menjane su u saglasnosti sa novim zahtevima koje je nametao rast tražnje za pristupom servisima, sadržajima ili aplikacijama.

Promene u Internet okruženju pre svega se odnose na dve najveće grupe učesnika, provajdere SA i provajdere IS. Provajderi SA teže približavanju sadržaja krajnjim korisnicima i, kada je to moguće, vertikalnoj integraciji. Provajderi IS teže proširivanju poslovanja kroz obezbeđivanje veleprodajnih servisa provajderima SA. Veći provajderi SA ostvaruju velike prednosti primenom vertikalne integracije i približavanjem krajnjim korisnicima u pogledu kontrole procesa obezbeđivanja sadržaja i ostvarivanja ekonomije obima. S obzirom na to da je unapređivanje iskustvenog kvaliteta od velikog značaja za diferencijaciju od konkurentnih provajdera SA, sklapanje odgovarajućih ugovora o interkonekciji može predstavljati način ostvarivanja strateške prednosti na tržištu. Sa druge strane, provajderi IS ulažu u platforme za obezbeđivanje sadržaja i aplikacija u cilju unapređenja profitabilnosti i ostvarivanja novih načina za generisanje prihoda. Takve platforme obezbeđuju sadržaje provajdera SA, treće strane, ali i sopstvene sadržaje i aplikacije. Na taj način, provajderi IS postaju direktni konkurenti provajderima SA. Provajderi IS koji obezbeđuju tranzit prinuđeni su da prate inovacije kroz ugovore o interkonekciji, kako bi obezbedili dovoljno opsluživanje saobraćaja. S obzirom da provajderi SA i provajderi IA koji obezbeđuju pristup krajnjim korisnicima sve češće sklapaju *peering* ugovore o interkonekciji, dolazi do značajnih promena cena i obima tranzitnog saobraćaja. Iz tih razloga, provajderi IS koji obezbeđuju tranzit šire svoje oblasti poslovanja.

U tačkama interkonekcije u Internet okruženju omogućeno je da se provajderi IS povezuju direktno, na osnovu *peering* ugovora, umesto sklapanja ugovora o tranzitiranju sa drugim provajderima, ili trećom stranom. Na taj način, saobraćaj se prosleđuje lokalno, bez potrebe za korišćenjem servisa *upstream* provajdera IS koji obezbeđuju tranzit. Time, difuzija različitih *peering* ugovora o interkonekciji u nekim situacijama može postati zamena za ugovore o tranzitiranju [Art14].

Postoji više razloga za smanjenje tranzitiranja saobraćaja. Pre svega, sve više se sklapaju *peering* ugovori o interkonekciji u odnosu na ugovore o tranzitiranju. Na tržištu su se pojavili novi učesnici koji ili nisu postojali ranije, ili njihova uloga nije bila značajna, kao što su CDN. Veći udeo saobraćaja se direktno prosleđuje između velikih provajdera SA i provajdera CDN servisa, a u nekim slučajevima i između korisnika. U opštem slučaju, tranzitiranje saobraćaja uslovljava veće kašnjenje u odnosu na *peering*. Ova karakteristika tranzitiranja saobraćaja predstavlja veliki nedostatak, s obzirom da sve više rastu zahtevi za obezbeđivanjem servisa zahtevnih u pogledu kašnjenja. U nekim slučajevima, provajderi SA ili CDN provajderi mogu se vertikalno integrisati i tako obezbeđivati servise koji su ranije primarno obezbeđivani od strane provajdera IS koji obezbeđuju tranzit [Ber12].

Cene tranzitiranja saobraćaja beleže značajan pad usled smanjenja troškova uređaja i konkurencije provajdera IS koji obezbeđuju tranzit. Cene CDN servisa takođe beleže pad, što se može opisati kao rezultat konkurentnosti CDN tržišta. Istovremeno, promene cena tranzitiranja saobraćaja utiču na promene CDN servisa. Slično tome, cene CDN servisa utiču na cene tranzitiranja saobraćaja [Ber12].

Snižavanje cena tranzitiranja saobraćaja i CDN cena u Internet okruženju dovodi do toga da čak i manji provajderi SA mogu imati mogućnost prenosa podataka sa visokim performansama. Snižavanje cena tranzitiranja saobraćaja primetno je u svim regionima i kreće se od 10% do 35% na godišnjem nivou, u zavisnosti od zrelosti tržišta i raspoložive infrastrukture [Ber12]. Ovi efekti donose brojne prednosti svim učesnicima u Internet okruženju. Neke neravnomernosti u raspodeli obima saobraćaja mogu uticati na pregovore o sklapanju ugovora o interkonekciji. Ukoliko to uslovi ugovora dozvoljavaju, takve neravnomernosti mogu se regulisati u kratkom vremenskom

periodu, najčešće za manje od godinu dana. Na taj način, tranzitiranje saobraćaja postaje dostupnije svim učesnicima, nezavisno od njihovog položaja na tržištu.

Cene tranzitiranja su u direktnoj vezi sa oportunitetnim troškovima *peering* relacija. Snižavanje cena tranzitiranja saobraćaja utiču i na snižavanje cena plaćenog *peering*-a. Na taj način, ugovori o plaćenom *peering*-u ostaju konkurentni ugovori za obezbeđivanje interkonekcije u Internet okruženju. Ipak, plaćeni *peering* ugovori čine samo mali udeo u ukupnim ugovorima koje provajderi IS sklapaju za obezbeđivanje interkonekcije.

Na maloprodajnim tržištima u Evropi uglavnom figurišu dva do pet provajdera IS (dva ili više provajdera koji poseduju fiksnu mrežu, i tri ili više provajdera koji poseduju mobilnu mrežu, uz tendenciju konvergencije ovih provajdera). Konkurencija između ovih provajdera je dovoljna da spreči nepravilnosti na tržištu. Na primer, ukoliko bi neki provajder IS odbio sklapanje *peering* ugovora o interkonekciji sa SA, postoje drugi provajderi IS preko kojih bi bilo moguće da posmatrani provajder SA ostvari indirektnu konekciju sa korisnicima [Art14].

Provajderi IS obezbeđuju pristup krajnjim korisnicima, koji se najčešće naplaćuje na *flat-rate* osnovi. Tada provajder IS generiše fiksni prihod po krajnjem korisniku, na mesečnom nivou, nezavisno od ukupnog vremena tokom kojeg pristupa Internetu i nezavisno od obima *upstream* i *downstream* saobraćaja. Generisani prihodi po krajnjem korisniku su, u proseku, ostali isti, iako je obezbeđeni propusni opseg vremenom povećavan. Ipak, veći broj opsluženih krajnjih korisnika kao rezultat povećanja obima saobraćaja po krajnjem korisniku nije povećao troškove provajdera IS po krajnjem korisniku iz više razloga. Najpre, marginalni troškovi za obezbeđivanje dodatnog Internet saobraćaja su vrlo niski. Provajderi IS najčešće moraju sklapati ugovore o tranzitiranju saobraćaja sa drugim provajderima IS. Naplate tranzitiranja obuhvataju i *upstream* i *downstream* saobraćaj. Takođe, cene tranzitiranja beleže pad tokom vremena. Kao što je već naglašeno, rast obima saobraćaja ne povećava prihode provajdera IS, ali povećanje broja krajnjih korisnika generiše prihode od novog krajnjeg korisnika [Ber12].

Promene u Internet okruženju dovele su do značajnog rasta obima saobraćaja u tačkama interkonekcije. Postoji velika razlika u obimu dolaznog i odlaznog saobraćaja. Pored potrebe za većim kapacitetima, zahtevi za boljim performansama pri obezbeđivanju novih sadržaja i aplikacija postaju sve stroži. Ulaganja moraju da prate i dinamiku tržišta u procesu obezbeđivanja sadržaja i aplikacija. Provajderi SA imaju mogućnost obezbeđivanja svojih sadržaja i aplikacija *over-the-top*, čime se smanjuju prihodi provajdera IS koji obezbeđuju pristup krajnjim korisnicima. Obezbeđivanje govornih servisa beleži pad, što dodatno smanjuje prihode provajdera IS koji obezbeđuju pristup krajnjim korisnicima. Stoga, troškovi ulaganja u proširivanje kapaciteta za unapređivanje interkonekcije predstavljaju veliki izazov za provajdere IS. Ovi provajderi teže prilagođavanju postojećih poslovnih modela, kao i implementaciji novih modela interkonekcije u cilju podrške inovativnom razvoju. U te svrhe, preduzimaju se sledeće aktivnosti:

- eliminisanje neefikasnih ili redundantnih oblasti poslovanja (na primer, raskidanje ugovora sa redundantnim provajderom IS koji obezbeđuje tranzitiranje saobraćaja);
- racionalizacija broja tačaka interkonekcije u kojima obim saobraćaja ne prelazi određeni prag (na primer, *peering* relacije u kojima opsluživanje saobraćaja ne prelazi 2-4 Gb/s);
- izbegavanje ulaganja ili povećanja troškova koji donose prednosti samo jednoj strani (na primer, izbegavanje ulaganja u proširenje kapaciteta na portovima gde postoji asimetrija u obimu prosleđenog saobraćaja);
- predlaganje plaćenog *peering*-a u slučajevima kada postoji izrazita asimetrija u obimu saobraćaja;
- pokretanje sopstvenih interaktivnih platformi čime se smanjuje oportunitetni trošak obezbeđivanja konkurentnih servisa OTT provajdera (na primer, *host*-ovanje video sadržaja OTT provajdera na sopstvenoj platformi);
- uspostavljanje vertikalne integracije u cilju povećanja prihoda; uvođenje ili postizanje veće zastupljenosti novih tehnologija.

Sve ove aktivnosti pružaju podršku unapređenju modela interkonekcije u Internet okruženju [Art14].

Promene u modelima interkonekcije i potreba za razvojem ekonomski održivih poslovnih modela koji će podržavati interkonekciju mreža u budućem Internetu mogu dovesti do suprotstavljenih interesa učesnika u interkonekciji, i potencijalno, do sporova. Većina do sada zabeleženih sporova nastala je usled asimetričnosti opsluženog saobraćaja i ugrožavanja pozicije provajdera IS na tržištu usled delovanja OTT provajdera. Ipak, važno je napomenuti da se pomenuti sporovi odnose samo na vrlo ograničen broj ugovora o interkonekciji, a više od 50% sporova rešeno je bez učešća treće strane. Regulatorna tela najčešće nisu intervenisala u slučaju sporova, a pažnja je primarno bila usmerena na poštovanje principa nediskriminacije i transparentnosti. Nadgledanje tržišta od strane regulatornih tela vrši se zbog rizika da se nemogućnost pregovaranja između učesnika na Internetu odrazi na degradaciju performansi, kao i zbog mogućih antikonkurentskih strategija primenjenih od strane vodećih učesnika na Internetu. U skladu s tim, regulatorna tela teže fleksibilnom regulatornom okviru koji omogućava razvoj tržišta i podržava inovativne poslovne modele [Art14].

4. PREGLED RELEVANTNE LITERATURE

Kao rezultat istraživanja u okviru ove doktorske disertacije predloženo je nekoliko novih, nezavisnih modela za rešavanje problema koji se javljaju pri vertikalnoj interkonekciji učesnika u budućem Internetu. Iz tog razloga, u ovom poglavlju dat je pregled relevantne literature u oblasti uspostavljanja ugovora o interkonekciji, definisanja optimalnih mehanizama za tarifiranje i alokaciju resursa *cloud* provajdera i optimizacije problema rutiranja i alokacije spektra u elastičnim optičkim mrežama.

4.1. Ugovori o interkonekciji

U cilju obezbeđivanja sadržaja krajnjim korisnicima, neophodno je uspostaviti vertikalnu interkonekciju između provajdera SA i provajdera IS. Zbog ograničenja u praktičnoj implementaciji najčešće predlaganog modela interkonekcije, koji se zasniva na troškovima nastalim zbog interkonekcije, u literaturi se predlažu alternativni modeli koji bi, bar u teoriji, mogli dati rezultate koji su bliski troškovnom modelu interkonekcije. U nastavku je dat pregled literature koja se bavi analizom primene koncepata *Revenue Sharing*, *Cost Sharing* i *Wholesale Price* ugovora o interkonekciji.

4.1.1. Koncept *Revenue Sharing*

Koncept *Revenue Sharing* ugovor definiše način podele prihoda između učesnika u vertikalnoj interkonekciji. Uspostavljanje *Revenue Sharing* ugovora između provajdera SA i provajdera IS analizirano je u [Wu11], [Mik15a], [Mik15b], [Mik15c]. S obzirom na to da provajderi IS definišu visoke cene tranzitiranja saobraćaja pri obezbeđivanju sadržaja krajnjim korisnicima u cilju maksimizacije sopstvenih profita, dolazi do narušavanja društvene dobiti. Pokazalo se da je na osnovu adekvatno definisanih cena

tranzitiranja moguće uspostaviti *Revenue Sharing* ugovor koji će podsticati učesnike da teže maksimizaciji društvene dobiti [Wu11]. *Revenue Sharing* ugovor u kojem učestvuju provajder SA, provajder IS zadužen za tranzitiranje saobraćaja i provajder IS koji obezbeđuje pristup krajnjim korisnicima analiziran je u [Lee13]. Posmatran je scenario visokog saobraćajnog opterećenja, u kojem je bio cilj izmestiti tražnju za pristup sadržajima. Za rešavanje tog problema, u [Lee13] predložene su tri različite strategije u zavisnosti od vrednovanja sadržaja i složenosti implementacije. Relacije između provajdera SA, provajdera IS i krajnjih korisnika modelovane su primenom *Revenue Sharing* ugovora u [Cou14]. Cilj je bio sagledati ekonomske posledice izostanka interkonekcije između konkurentnih provajdera IS u procesu obezbeđivanja sadržaja krajnjim korisnicima. Rezultati su pokazali da je bilo koji oblik uspostavljanja interkonekcije bolji od situacije u kojoj nema definisanih ugovora o interkonekciji između konkurentnih provajdera IS [Cou14]. Situacija u kojoj nema definisanih ugovora o interkonekciji može dovesti do nepravičnih raspodela prihoda između učesnika, kao i smanjiti podsticaje za buduća ulaganja u infrastrukturu. Primenom *Revenue Sharing* ugovora moguće je postići pravičnu podelu prihoda kojom se mogu ostvariti viši prihodi za sve učesnike u interkonekciji [He06]. *Revenue Sharing* ugovor između provajdera SA i provajdera IS koji teže smanjenju opsluživanja nedozvoljenih sadržaja analiziran je u [Par14]. Rezultati ukazuju na to da kada provajder IS preduzima korake u cilju smanjenja opsluživanja nedozvoljenih sadržaja, provajder SA ima veće motive za uspostavljanje *Revenue Sharing* ugovora sa provajderom IS. Takođe, uočen je rast prihoda kako provajdera IS, tako i provajdera SA [Par14].

Revenue Sharing ugovor ima veliku primenu u *cloud* okruženju [Wei15], [Zan14], [Coh14], [Has15a]. Deljenje resursa uz podelu prihoda u *cloud* federaciji prikazano je u [Has15a], pri čemu *cloud* federacija predstavlja skup *cloud* provajdera koji uspostavljaju različite ugovore u cilju obezbeđivanja *cloud* resursa u obliku virtuelnih mašina. Predloženi *Revenue Sharing* ugovor obezbeđuje pravičnu i održivu koalicionu strukturu, maksimizira se društvena dobit i postiže troškovno efikasna podela resursa [Has15a]. *Revenue Sharing* ugovor može se primeniti za koordinaciju lanca snadbevanja u *cloud* okruženju [Wei15]. Koordinacija lanca snadbevanja u *Software-as-a-Service cloud* okruženju analizirana je u [Lin15]. Na osnovu teorijske i kvantitativne

analize pokazano je da ugovor koji predstavlja kombinaciju *Revenue Sharing* ugovora, *Cost Sharing* ugovora i *Wholesale Price* ugovora obezbeđuje najbolju koordinaciju, dok svaki pojedinačan ugovor degradira performanse.

4.1.2. Koncept *Cost Sharing*

U slučaju primene *Cost Sharing* ugovora, učesnici u interkonekciji treba da podelu troškove uspostavljanja interkonekcije. Najveći izazov u primeni ovog ugovora je koliko naplatiti uspostavljanje interkonekcije kojem učesniku, tako da ukupni iznos naplate pokrije troškove. Problem podelu troškova je dosta izučavan u ekonomiji i teoriji igara [Dob17], [Ble08], [Deb99], [Has15b], [Meh07], [Mou99], [Rou09]. Osnovni okvir izučavanja problema podelu troškova su *Cost Sharing* igre, u kojima trošak predstavlja parametar koji se dodeljuje svakom učesniku i/ili svakoj koaliciji. Strateške *Cost Sharing* igre sa tzv. proizvoljnim deljenjem, koje se zasnivaju na kombinatornim optimizacionim problemima analizirane su u [Hoe13]. Ove igre se često primenjuju za podelu troškova u kontekstu Interneta, kada se troškovi vezuju za investicije u odgovarajuće resurse. U ovim koalicionim igrama, od najvećeg značaja je odrediti pravičnu i održivu podelu troškova između učesnika. Preduslov za to je poznavanje troškova koji nastaju usled obezbeđivanja konkretnog servisa. Učesnici uglavnom biraju što jednostavnije metode procene troškova. U [Gya12], analizirani su različiti *Cost Sharing* ugovori sa aspekta kompromisa između jednostavnosti implementacije i preciznosti u okosnici mreža. Pokazalo se da u slučaju primene jednostavnijih metoda obračuna troškova postoji značajna razlika između izračunatih i stvarnih troškova, što za posledicu ima i loše uspostavljene *Cost Sharing* ugovore.

Imajući u vidu da u scenarijima velikih dimenzija, kao što je Internet, ne postoji centralizovano upravljanje saobraćajem, svaki učesnik je nezavisna celina koja funkcioniše u skladu sa sopstvenim interesima i optimizuje svoje funkcije cilja na lokalnom nivou. Četiri različita *Cost Sharing* mehanizma u jednom takvom scenariju predložena su u [Bil10]. Prvi mehanizam podrazumeva podelu ukupnih troškova za opsluživanje saobraćaja svim učesnicima podjednako; drugi mehanizam deli trošak

svakog linka između učesnika proporcionalno ukupnim troškovima za opsluživanje saobraćaja na posmatranoj putanji kojoj pripada dati link; treći mehanizam deli ukupan trošak proporcionalno trošku za uspostavljene putanje između učesnika, dok četvrti mehanizam podrazumeva jednaku podelu troškova svakog linka učesnicima koji se opslužuju datim putanjama. Smatra se da je mehanizam održiv ukoliko zadovoljava kriterijume pravičnosti i troškovne efikasnosti [Bil10]. Rezultati pokazuju da su održivi drugi, treći i četvrti predloženi *Cost Sharing* mehanizam, dok prvi predloženi *Cost Sharing* mehanizam zadovoljava samo kriterijum pravičnosti [Bil10].

4.1.3. *Koncept Wholesale Price*

Wholesale Price ugovor podrazumeva da se obezbeđivanje veleprodajnog servisa plaća unapred, po unapred definisanoj, jediničnoj veleprodajnoj ceni. S obzirom na to da je tražnja za obezbeđivanje konkretnog servisa na maloprodajnom nivou neizvesna, moguća je pojava gubitaka, što je najveći nedostatak *Wholesale Price* ugovora. Takođe, učesnici imaju suprotstavljene interese, tj. ono što je trošak jednog učesnika, predstavlja profit drugog. *Wholesale Price* ugovori su često primenjivani za koordinaciju lanaca snadbevanja u različitim granama privrede [Wan13], [Hu18], [Nie16], [Zha14]. Tako, moguće je ostvariti koordinaciju lanaca snadbevanja u oblasti obezbeđivanja servisa kroz *Wholesale Price* ugovor [Hai10], [Hai11].

Wholesale Price ugovor ima čestu primenu u procesu obezbeđivanja sadržaja i aplikacija, naročito od strane manjih provajdera SA [Yoo10]. U [Son10], posmatrani su različiti *Wholesale Price* ugovori između vertikalno integrisanog učesnika i novog učesnika na tržištu mobilnih komunikacija. Prikazani su načini definisanja veleprodajne cene na osnovu analize konkurencije. U odsustvu regulacije, na definisanje veleprodajne cene može uticati struktura posmatranog tržišta, ili strateško pozicioniranje vertikalno integrisanog učesnika na tržištu. Ukoliko je struktura tržišta takva da postoji zdrava konkurencija, ne postoje prepreke za ulazak novog učesnika na tržište. Strateško pozicioniranje oslikava konkurentske odnose između postojećih i novih učesnika. Rezultati su pokazali da se u uslovima razvijene konkurencije na veleprodajnom tržištu

cene definišu tako da budu niže od marginalnih troškova neefikasnog postojećeg učesnika na tržištu [Son10]. Kada na veleprodajnom tržištu figurišu efikasni postojeći učesnici, mogući su različiti načini definisanja veleprodajne cene u zavisnosti od relativne efikasnosti novih učesnika na tržištu i razlike u troškovima postojećih učesnika na tržištu. Na taj način, u slučaju postojanja velike razlike u troškovima između postojećih učesnika i prisustva novog, efikasnog učesnika, veleprodajna cena će biti jednaka marginalnom trošku neefikasnog postojećeg učesnika na veleprodajnom tržištu. Kada postoji velika razlika u troškovima između postojećih učesnika a novi učesnik se odlikuje srednjom efikasnošću, ne postoji razvijena konkurencija na veleprodajnom tržištu. Tada se veleprodajna cena definiše tako da se maksimizira profit efikasnog postojećeg učesnika. Poslednja opcija je da samo neefikasni postojeći učesnik sklapa *Wholesale Price* ugovor sa novim učesnikom na tržištu. Osnovni nedostatak analize prikazane u [Son10] je slabo uporište u realnim situacijama.

4.2. Pregled mehanizama tarifiranja i alokacije resursa u *cloud* okruženju

Prednosti migracije na *cloud* u procesu obezbeđivanja sadržaja krajnjim korisnicima od strane vertikalno integrisanog provajdera SA prikazane su u [Kos18]. Pristup i korišćenje resursa *cloud* provajdera najčešće se naplaćuje u zavisnosti od obima korišćenja. U literaturi se taj tarifni mehanizam može naći pod različitim nazivima, na primer: *pay-per-use*, *usage-based*, *usage-sensitive*, *pay-as-you-go* [Wie18]. Karakteristike ovih tarifnih mehanizama se vrlo često menjaju od strane *cloud* provajdera. Pregled osnovnih karakteristika različitih tarifnih mehanizama koje su implementirali različiti *cloud* provajderi, njihove prednosti i nedostaci prikazani su u [Wan16]. Za primenu koncepta tarifiranja u zavisnosti od obima korišćenja, koje se sreće u *Cloud Computing*-u, neophodno je implementirati procese i mehanizme za merenje obima korišćenja, agregirati rezultate merenja, vršiti naplatu i održavati računovodstvene podatke. Korisnici plaćaju fiksnu cenu po jedinici vremena za

korišćenje *cloud* resursa po instanci (jedinici *cloud* resursa). Međutim, imajući u vidu da tražnja za pristup *cloud* resursima varira, fiksni mehanizmi tarifiranja mogu rezultirati lošim iskorišćenjem resursa. *Cloud* provajderi mogu unaprediti iskorišćenje svojih resursa primenom dinamičkih mehanizama tarifiranja kroz obezbeđivanje *spot* instanci. Na taj način, omogućava se pristup neiskorišćenim resursima po nižim cenama kroz mehanizme aukcija. Međutim, ove instance su pogodne samo korisnicima koji imaju veću toleranciju na kašnjenja i moguće otkaze. Analiza opravdanosti uvođenja dinamičkog tarifiranja prikazana je u [Abh12]. Uvođenje *spot* instanci može stvoriti cenovnu diskriminaciju, s obzirom da korisnici koji pristup *cloud* resursima vrednuju manje mogu ostvariti pristup *spot* instancama. Takođe, obezbeđivanje *spot* instanci predstavlja jeftiniju alternativu onim korisnicima koji nisu osetljivi na kašnjenje, čime se smanjuje prihod *cloud* provajdera u odnosu na situaciju u kojoj bi se primenjivao samo fiksni mehanizam tarifiranja. Kako bi se kvantifikovale prednosti i nedostaci primene fiksnog i dinamičkog tarifiranja, u [Abh12] je pretpostavljen jednostavan scenario sa heterogenim korisnicima. Najpre je analizirana izolovana primena fiksnog, odnosno dinamičkog tarifiranja, a zatim i njihova istovremena primena. *Cloud* okruženje je opisano kao sistem masovnog opsluživanja. Pokazalo se da postoji kritična vrednost vremena čekanja na opslugu koja utiče na odluku korisnika da li će pristupiti *cloud* resursima primenom fiksnog ili dinamičkog mehanizma tarifiranja. Takođe, očekivani prihod *cloud* provajdera je veći u slučaju postojanja samo fiksnog mehanizma tarifiranja u odnosu na situaciju istovremene primene fiksnog i dinamičkog mehanizma tarifiranja [Abh12].

U teoriji, prednosti od primene dinamičkih mehanizama tarifiranja imaju i *cloud* provajderi i korisnici. Korisnici mogu ostvariti niže troškove za pristup *cloud* resursima u periodima nižeg saobraćajnog opterećenja. *Cloud* provajderi mogu podsticati rast tražnje u periodu nižeg saobraćajnog opterećenja, na osnovu čega se postiže bolje iskorišćenje resursa i smanjenje troškova. U *cloud* okruženju, postoji jaka konkurencija ne samo između različitih *cloud* provajdera, već i u vremenu opsluživanja korisnika jednog *cloud* provajdera u situaciji kada korisnici procene da će cene za pristup resursima datog *cloud* provajdera u budućnosti biti niže [Wie15]. Očekuje se da će dinamički tarifni mehanizmi imati sve veću primenu u budućnosti.

Kako bi se iskoristile prednosti *cloud* instanci na zahtev i *spot* instanci u pogledu pouzdanosti i nižih troškova, u [Xu16] je predložen okvir za određivanje optimalnog pristupa *cloud* resursima. Taj okvir obezbeđuje dovoljnu pouzdanost na osnovu korišćenja instanci na zahtev, kao i niže troškove na osnovu korišćenja *spot* instanci. Pokazalo se da je moguće ostvariti uštedu u troškovima od 84%, bez značajne degradacije performansi, uz verovatnoću otkaza usled terminiranja *spot* instanci od 13%.

U [Bas15], predložen je model koji *cloud* provajderima pruža podršku u pronalaženju optimalnih tarifnih mehanizama koji se nude korisnicima u regionima sa različitim nivoom razvoja širokopojsnih servisa. Donošenje odluke o primeni konkretnog tarifnog mehanizma modelovano je na osnovu dobiti korisnika koja je predstavljena kao funkcija dva vektora. Prvi vektor predstavlja skup parametara koji doprinose unapređenju dobiti korisnika, dok drugi vektor predstavlja skup parametara koji svojim negativnim efektima umanjuju dobit korisnika. Prednost vektorskog prikaza uticaja na dobit korisnika je ta što bi pojedinačni parametri imali različitu vrednost za različite *cloud* provajdere. U okviru modela, analizirana su dva optimalna tarifna mehanizma koji se zasnivaju na naplati u zavisnosti od korišćenja i fiksnom tarifiranju.

Cloud Computing postao je složena vertikalna struktura u kojoj *cloud* provajderi ne moraju biti homogeni. Na taj način, IaaS i PaaS *cloud* provajderi mogu obezbeđivati fizičke i virtuelne resurse, platforme, servere, skladišne kapacitete i mrežu, dok SaaS *cloud* provajderi mogu obezbeđivati aplikacije krajnjim korisnicima na osnovu resursa IaaS ili PaaS *cloud* provajdera. Značaj cenovne konkurencije *cloud* provajdera u jednoj takvoj vertikalnoj strukturi, kao i uticaj konkurencije na efikasnost alokacije *cloud* resursa analiziran je u [Ans14]. Rezultati pokazuju da sa razvojem konkurencije profit IaaS i PaaS provajdera značajno opada, dok SaaS provajderi ostvaruju profit čak i u situacijama kada postoji vrlo razvijena konkurencija u obezbeđivanju servisa.

Određivanje optimalnog tarifnog mehanizma u relacijama između nekoliko SaaS provajdera i IaaS provajdera analizirano je u [Val13]. Pretpostavlja se da posmatrani IaaS provajder nudi tarifne mehanizme rezervacije, na zahtev i *spot* tarifiranje, dok SaaS provajderi obezbeđuju aplikacije krajnjim korisnicima na osnovu *cloud* resursa IaaS

provajdera. Analiza u [Val13] vršena je u dve faze. U prvoj fazi, svaki SaaS provajder najpre određuje optimalan broj potrebnih rezervisanih i instanci na zahtev. U drugoj fazi, SaaS provajderi međusobno se nadmeću za pristup *spot* instancama. Cilj SaaS provajdera je optimizacija njihovih funkcija dobiti koje obuhvataju ispunjavanje ciljnih performansi i optimizaciju troškova, dok je cilj IaaS provajdera maksimizacija prihoda na osnovu određivanja *spot* cena. Numerički rezultati su pokazali da IaaS provajder ima interes u definisanju *spot* cena čije su vrednosti niže od vrednosti ponuda SaaS provajdera u procesu aukcija, a sve u cilju stvaranja podsticaja da SaaS provajderi zahtevaju pristup većem broju *spot* instanci. Na taj način, IaaS provajder povećava svoje prihode, dok profit SaaS provajdera opada. Ipak, stvaraju se uslovi da SaaS provajderi ostvaruju bolje performanse u obezbeđivanju aplikacija krajnjim korisnicima [Val13].

4.2.1. Pregled aukcijskih mehanizama za tarifiranje i alokaciju cloud resursa

U literaturi se može naći više predloženih algoritama za tarifiranje i alokaciju resursa u *cloud* okruženju zasnovanih na aukcijama [Bar18], [Kum17], [Lu18]. Trenutno najzastupljenija istraživanja u oblasti primene aukcijskih mehanizama u *cloud* okruženju usmerena su na statičke zahteve sa jednom vrstom raspoloživih resursa. Usko povezano sa tarifiranjem pristupa resursima jeste i pitanje alokacije *cloud* resursa. Sveobuhvatan pregled aukcijskih mehanizama za alokaciju *cloud* resursa može se naći u [She18] i [Mik17a]. Postoji više klasifikacija aukcijskih mehanizama u *cloud* okruženju [Bar18]. Neki od tih mehanizama su: *one-sided*, *double-sided* i kombinatorne aukcije.

U *one-sided* aukcijama, ponuđači kreiraju svoje ponude bez uvida u vrednosti ponuda drugih ponuđača. Ponuđač sa najvišom vrednosti ponude ostvaruje mogućnost pristupa resursima. Najpoznatiji aukcijski mehanizam ove vrste je *Vickrey* aukcija, takođe poznata i kao *second-price* aukcija, kada se resursi dodeljuju ponuđaču sa drugom najvišom vrednošću ponude. Vrlo čestu primenu ima uniformna aukcija [Zha11]. U takvoj aukciji, *cloud* provajder alocira resurse korisnicima u opadajućem poretku njihovih ponuda, a korisnici plaćaju iznos koji je jednak vrednosti najniže ponude koja

obezbeđuje pravo pristupa resursima u aukciji. Koncept marginalne ponude, odnosno, najviše ponude koja ne obezbeđuje pristup resursima u procesu aukcije za tarifiranje i alokaciju *cloud* resursa pri *second-price* aukciji predložen je u [Lin10]. Taj koncept obezbeđuje visoke prihode *cloud* provajderima, ali istovremeno i malu dobit za korisnike.

U slučaju primene *double-sided* aukcija, i *cloud* provajder i korisnik *cloud* resursa kreiraju svoje ponude. Ukoliko se ponude *cloud* provajdera i korisnika *cloud* resursa mogu kreirati u bilo kom trenutku, radi se o kontinualnim dvostrukim aukcijama. Detaljna analiza primene *double-sided* mehanizama aukcija u *cloud* okruženju data je u [Kum17]. U *double-sided* aukcijama, korisnici *cloud* resursa mogu zahtevati pristup resursima različitih *cloud* provajdera, dok *cloud* provajderi mogu obezbeđivati pristup resursima brojnim korisnicima. Različiti *cloud* provajderi nude različite tarifne mehanizme. Iz tog razloga, kreiranje adekvatnog zahteva za pristup *cloud* resursima često predstavlja veliki problem korisnicima. Ipak, *double-sided* aukcije mogu biti efikasno rešenje za tarifiranje i alokaciju *cloud* resursa na dvostranim tržištima.

Kombinatorne aukcije često se koriste za tarifiranje i alokaciju *cloud* resursa. U tom slučaju, *cloud* provajderi nude grupe resursa za koje korisnici kreiraju ponude, pri čemu postoji najmanje dva tipa resursa. Kombinatorne aukcije smatraju se pogodnim rešenjem kako za *cloud* provajdere, tako i za korisnike. Problem alokacije nekoliko tipova VM instanci većem broju korisnika koji zahtevaju pristup skupu VM instanci različitih tipova, analiziran je u [Zam13]. Predložena su dva mehanizma alokacije *cloud* resursa zasnovana na kombinatornim aukcijama. Prvi mehanizam razmatra alokaciju nekoliko tipova instanci, pri čemu postoji više raspoloživih instanci po svakom tipu instanci. Drugi mehanizam rešava alokaciju koja se zasniva na vrednostima ponuda korisnika i broju zahtevanih instanci, uzimajući u obzir relativni kapacitet VM instanci. Ova dva mehanizma, dalje su poređena sa mehanizmima alokacije koji se zasnivaju na fiksnim cenama. Pokazalo se da mehanizmi kombinatornih aukcija daju bolja rešenja u odnosu na mehanizme alokacije zasnovane na fiksnim cenama, i to u pogledu iskorišćenja resursa, prihoda i efikasnosti alokacije [Zam13]. Primenom ovih

mehanizama moguće je ostvariti više prihode *cloud* provajdera i efikasnije iskorišćenje resursa, uz niže troškove. Međutim, dobit korisnika nije obuhvaćena analizom.

Uprkos svojoj jednostavnosti, statički mehanizmi tarifiranja ne pružaju podršku maksimizaciji prihoda, s obzirom da neiskorišćeni resursi ne generišu prihode već troškove. Imajući u vidu da tražnja za pristup resursima *cloud* provajdera varira tokom vremena, poželjna je primena dinamičkih tarifnih mehanizama za optimizaciju prihoda *cloud* provajdera. Podešavanje cena na osnovu stvarnog ili prognoziranog odnosa ponude i tražnje može omogućiti izmeštanje tražnje iz perioda visokog opterećenja ka periodu niskog opterećenja. Cilj dinamičkih mehanizama tarifiranja je iznajmljivanje neiskorišćenih resursa po nižim cenama, kako bi se unapredilo iskorišćenje resursa, kao i povećanje cena u slučaju da tražnja za pristupom *cloud* resursima raste [Wan16].

Cloud provajderi nude skup različitih računarskih i skladišnih resursa različitim grupama korisnika primenom različitih tarifnih mehanizama. U skladu s tim, iz perspektive korisnika *cloud* resursa, adekvatan tarifni mehanizam podrazumeva efikasno obezbeđivanje resursa po prihvatljivoj ceni. Iz perspektive *cloud* provajdera, efikasan tarifni mehanizam obezbeđuje maksimizaciju profita uz optimizaciju iskorišćenosti resursa. Zbog svojih prednosti, različiti mehanizmi aukcija mogu biti pogodni za realizaciju dinamičkog tarifiranja u *cloud* okruženju [Too16]. Aukcije podstiču korisnike *cloud* resursa da biraju vrednosti ponuda koje su zaista spremni da plate za zahtevane resurse, obezbeđuju da se resursi alociraju korisnicima koji ih najviše vrednuju [Zam13], a cene se koriguju u skladu sa odnosom ponude i tražnje na osnovu podsticanja konkurencije između korisnika. Efikasnost iskorišćenja *cloud* resursa je unapređena primenom aukcijskih mehanizama za tarifiranje i alokaciju [Tai11]. Stoga, takvi tarifni mehanizmi mogu efikasno odrediti tržišnu vrednost *cloud* resursa, naročito u slučaju alokacije relativno ograničenih resursa potencijalno velikom broju korisnika *cloud* resursa [Chi14].

Posmatrano iz ugla korisnika *cloud* resursa, aukcijski mehanizmi tarifiranja definišu, u proseku, niže cene u poređenju sa fiksnim mehanizmima tarifiranja [Jun11], [Kam15]. *Amazon EC2 spot pricing*, kao tipičan primer tarifiranja zasnovanog na aukcijama, obezbeđuje značajne uštede u slučaju kada se koriste *spot* instance umesto instanci na

zahtev [Jav13]. Neke empirijske studije pokazuju da uz adekvatno definisane ponude korisnika, uštede na osnovu korišćenja *spot* instanci umesto instanci na zahtev mogu biti i do 36% [Les13]. Pored toga, *spot* tarifiranje unapređuje iskustveni kvalitet [Hu13]. U situacijama kada je tražnja za pristupom rezervisanim i instancama na zahtev, korisnici mogu smanjiti vreme odziva korišćenjem alternativnih instanci, *spot* instanci ili njihove varijacije - *spot block* instanci. Takođe, kombinatorne aukcije obezbeđuju pogodnije uslove za alokaciju različitih tipova *cloud* resursa korisnicima sa visokim zahtevima. Uz odgovarajuću tržišnu strukturu, moguće je ostvariti pravične relacije između *cloud* provajdera i korisnika kroz mehanizme aukcija. Na taj način se ostvaruje veća društvena dobit na nivou celog *cloud* okruženja [Shi16].

4.2.2. Strategije kreiranja ponuda u mehanizmima tarifiranja zasnovanim na aukcijama

Izbor odgovarajuće strategije pri kreiranju ponuda u aukcijskim mehanizmima tarifiranja i alokacije resursa u *cloud* okruženju, od krucijalnog je značaja iz perspektive korisnika *cloud* resursa. *Cloud* provajder alokira neiskorišćene resurse korisnicima u zavisnosti od svih pristiglih zahteva sa ponudama i raspoloživosti resursa. Nakon predaje korisničkih ponuda, *cloud* provajder agregira ponude i tražnju za pristupom *cloud* resursima i upoređuje je sa ponudom. Angažovanje neiskorišćenih resursa *cloud* provajdera ostvaruje značajne uštede u troškovima kako za *cloud* provajdere, tako i za korisnike. Međutim, izbor odgovarajuće strategije pri kreiranju ponuda je od presudnog značaja za korisnike. U opštem slučaju, izabrana strategija utiče na troškove, na vreme čekanja na opsluživanje i stopu terminiranja [Kar15]. Ponude niže vrednosti smanjuju troškove. Međutim, druge mere performansi, kao što su vreme usluge i stopa terminiranja, bivaju narušene. Iz tog razloga, *cloud* provajderi često preporučuju izbor strategije kojom se kreiraju visoke vrednosti ponuda, kako bi se smanjila verovatnoća terminiranja *cloud* instance pre završetka opsluživanja. Korisnici koji su spremni da plate samo niže cene za pristup *cloud* resursima najčešće kreiraju ponude niskih vrednosti. Međutim, *cloud* instance koje su inicirane od strane korisnika sa niskom vrednošću ponude imaju manju raspoloživost i veliku verovatnoću terminiranja u

slučaju kada raste tržišna cena pristupa *cloud* resursima. Česta terminiranja mogu dovesti do otkaza, produženog vremena opsluge i sveukupnim narušavanjem performansi. Dakle, strategije kreiranja ponuda predstavljaju kompromis između troškova i raspoloživosti, odnosno, stope terminiranja. Adekvatna strategija kreiranja ponuda podrazumeva strategiju koja minimizira troškove uz zadovoljavanje različitih ograničenja, kao što je zahtevano vreme opsluživanja. Složenost adekvatnog izbora strategije je razlog što, uprkos nižim cenama, pristup *cloud* resursima primenom aukcija još uvek nema rasprostranjenu primenu [Sha17].

Nekoliko strategija kreiranja ponuda analizirano je u [Sha17]: kreiranje ponuda čija je vrednost približna vrednosti cene rezervisanih instanci, kreiranje ponuda čija je vrednost viša od vrednosti cene *spot* instanci, kreiranje ponuda čija je vrednost približna vrednosti cene instanci na zahtev i kreiranje ponuda čija je vrednost viša od vrednosti cene instanci na zahtev. Ta studija je pokazala da se izborom strategije kreiranja ponuda čija je vrednost približna vrednosti cene rezervisanih instanci smanjuju troškovi uz duže čekanje na opslugu i višu stopu terminiranja instance. Takođe, usvajanjem strategije kreiranja ponuda čija vrednost je viša od cene instance na zahtev ostvaruje se najniže vreme čekanja na opsluživanje i najniža stopa terminiranja, ali i viši troškovi u odnosu na druge strategije kreiranja ponuda. Pokazalo se i to da je rast marginalnih troškova značajno viši od smanjenja vremena čekanja na opslugu i smanjenja stope terminiranja. Međutim, 35% korisnika bira strategiju kreiranja ponuda čija vrednost je iznad cene instance na zahtev. Kreiranje ponuda čija je vrednost viša od prosečne *spot* cene, kao i kreiranje ponuda čija je vrednost približno jednaka ceni instance na zahtev obezbeđuje zadovoljavajući kompromis između troškova, vremena čekanja na opsluživanje i terminiranja. Dakle, strategija kreiranja ponuda čija vrednost je približno jednaka ceni rezervisanih instanci pogodna je za korisnike *cloud* resursa koji su spremni da plate niske cene za rezervaciju resursa i imaju fleksibilne rokove za opsluživanje. Strategije kreiranja ponuda sa vrednostima koje su više od srednje vrednosti *spot* cene i strategije kreiranja ponuda sa vrednostima koje su približno jednake ceni instance na zahtev su prihvatljive za korisnike koji imaju iste zahteve u pogledu troškova, vremena čekanja na opsluživanje i terminiranje.

Optimizacija odnosa troškovi - raspoloživost *cloud* resursa može se ostvariti kroz različite strategije kreiranja ponuda. Kada korisnik povećava vrednost svoje ponude, raspoloživost date instance se povećava na račun povećane cene po satu korišćenja. Takođe, kreiranje ponuda sa velikim rasponom vrednosti ne utiče na raspoloživost neiskorišćenih *cloud* resursa. Isto važi i za troškove, s obzirom da u aukciji ne postoje penali za kreiranje ponuda previsokih vrednosti. Još jedan važan parametar je učestanost terminiranja. Nezavisno od vrednosti ponude, terminiranja su neizbežna pri pristupanju neiskorišćenim *cloud* resursima. U skladu s tim, neke studije su pokazale da korisnici ne moraju birati neke složene strategije pri kreiranju ponuda [Sha17]. Umesto toga, korisnici treba da biraju odgovarajući tip instance kako bi se smanjila verovatnoća terminiranja, pri čemu vrednost ponude treba da bude približno jednaka ceni instance na zahtev. Ipak, poželjno je birati različite tipove instanci kako bi bilo moguće izvršiti migraciju između instanci po potrebi. Na taj način, moguće je značajno smanjiti verovatnoću otkaza usled terminiranja i istovremeno smanjiti troškove. Efikasnost iskorišćenja *cloud* resursa takođe može biti unapređena. Dakle, odgovarajuća kombinacija tipova instanci i primenjena politika tolerancije na otkaze su ključni faktori koji određuju performanse i troškove u *cloud* okruženju.

4.3. Pregled algoritama za rutiranje i alokaciju spektra u elastičnim optičkim mrežama

Tokom poslednjih nekoliko godina, vršena su brojna istraživanja u oblasti elastičnih optičkih mreža. Koncept elastičnih optičkih mreža, prednosti i izazovi u primeni prikazani su u [Jin09]. Arhitektura, ključni pokretači razvoja, prednosti i inicijalni pomaci u standardizaciji analizirani su u [Ger12]. Najznačajnija karakteristika elastičnih optičkih mreža je veća granularnost u alokaciji spektra. Ipak, to dovodi do brojnih izazova u arhitekturi i kontroli takvih mreža, što zahteva napredne tehnike upravljanja spektrom [Tal14]. Imajući u vidu najvažniju karakteristiku elastičnih optičkih mreža, fleksibilno i elastično dodeljivanje spektra u skladu sa saobraćajnim zahtevima, ove

mreže podržavaju troškovno efikasan razvoj *Cloud Computing*-a. Obezbeđivanje *cloud* saobraćaja preko elastičnih optičkih mreža analizirano je u [Cli13], gde je opisana tipična arhitektura elastične optičke mreže koja se može primeniti na transportnom nivou mreže sa konvencionalnim, ali i *cloud data* centrima.

Uspostavljanje puteva svetlosti u elastičnim optičkim mrežama obuhvata problem rutiranja i alokacije spektra, RSA problem. Rešavanje ovog problema je od ključnog značaja u elastičnim optičkim mrežama i zahteva sveobuhvatan pristup [Zha13], [Vel16]. RSA problem može se proširiti na RMSA problem na osnovu uvođenja adaptivnih modulacionih tehnika. RMSA problem može rešiti problem transparentnog dometa i degradacije signala. Takođe, moguće su značajne uštede u iskorišćenju spektra [Gos14a]. Detaljan pregled karakteristika RSA i RMSA sa potencijalnim primenama u statičkim i dinamičkim saobraćajnim scenarijima prikazan je u [Abk17].

RSA i RMSA su NP kompletni problemi [Chr11], [Wan11]. Nekoliko formulacija sa celobrojnim linearnim programiranjem (*Integer Linear Programming*, ILP), kao i različitih metaheurističkih algoritama predloženo je za rešavanje RSA problema [Gos14a], [Gos15], [Chr11], [Vel12], [Kli11], [Wal14], [Mar17], [Kli13], [Aib14b], [Gos14b]. U opštem slučaju, većina predloženih predloženih ILP modela ima za cilj minimizaciju ukupnog broja zauzetih segmenata spektra, ili maksimalnog broja zauzetih segmenata spektra po linku u posmatranoj elastičnoj optičkoj mreži. ILP model koji minimizira iskorišćenje spektra i deli RMSA problem na dva potproblema, problem rutiranja i modulacije i problem alokacije spektra, predložen je u [Chr11]. Složenost RSA problema može se značajno smanjiti uvođenjem koncepta kanala za susedne segmente spektra. ILP formulacija zasnovana na dodeli kanala predložena je u [Vel12], a pokazalo se da je efikasna čak i u realističnim uslovima u mreži. U [Wan11], predložena je ILP formulacija za minimizaciju alociranog spektra, kao i heuristika koja se zasniva na adaptivnoj selekciji, tako da se linkovi za koje postoji velika verovatnoća zagušenja izbegavaju pri uspostavljanju puta svetlosti. Pokazalo se da predložena heuristika ostvaruje bolje performanse u odnosu na druge heuristike i obezbeđuje rešenja koja su bliska optimalnim. RSA algoritam sa zaštitom dodeljenih puteva svetlosti u elastičnim optičkim mrežama analiziran je u [Wal14], gde su predloženi ILP

formulacija, algoritam zasnovan na *Tabu Search* (TS) metaheuristici, kao i hibridni algoritam *Adaptive Frequency Assignment-TS*. Komparativna analiza je pokazala da algoritmi predloženi u [Wal14] ostvaruju bolja rešenja u odnosu na slične algoritme. Problem *anycast* i *unicast* RSA u elastičnim optičkim mrežama sa zaštitom dodeljenih puteva svetlosti, formulisan kao ILP, uz predloženu heuristiku za njegovo rešavanje, analiziran je u [Gos14b]. RMSA problem sa *anycast* i *unicast* rutiranjem u [Gos14a] formulisan je kao ILP, sa tri različita kriterijuma u funkciji cilja, i to: troškovima u mreži, potrošnjom energije i iskorišćenjem spektra. Ta analiza je proširena u [Gos15], tako da su analizirane četiri funkcije cilja (optimizacija troškova, potrošnje energije, maksimalnog broja zauzetih segmenata spektra na linku i prosečnog iskorišćenja spektra). Takođe, u [Gos14b] je predložen i efikasan *Tabu Search* algoritam za rešavanje datog problema.

Istovremena optimizacija *unicast*, *anycast* i *multicast* saobraćaja u elastičnim optičkim mrežama sa zaštitom dodeljenih puteva svetlosti primenom dve metaheuristike, *Tabu Search* i *Particle Swarm Optimization*, prikazana je u [Gos19]. Problem je formulisan kao ILP sa dva kriterijuma u funkciji cilja, a to su prosečna i maksimalna iskorišćenost spektra. Simulacije su vršene za tri realna scenarija mreže. Pokazalo se da *Tabu Search* algoritam daje najbolja rešenja sa zadovoljavajućim vremenom rada računara, dok *Particle Swarm Optimization* pristup nema dovoljnu skalabilnost za rešavanje većih instanci [Gos19].

Dva optimizaciona modela za rešavanje *anycast* RSA problema predložena su u [Miy19]. Prvi minimizira maksimalan broj potrebnih segmenata spektra koji treba da zadovolji zahteve za opsluživanje. Drugi optimizacioni model maksimizira obim saobraćaja koji se može opslužiti određenim brojem segmenata spektra. U cilju dobijanja optimalnih rešenja, izvršena je relaksacija ograničenja alokacije istih segmenata spektra na linkovima i primenjivani su različiti *greedy* algoritmi. Ti algoritmi su analizirani i poređeni u pogledu kriterijuma izbora puteva svetlosti, strategije alokacije spektra i načina opsluživanja. Rezultati su pokazali da relaksacija ograničenja alokacije istih segmenata spektra na linkovima daje skoro optimalna rešenja. U slučaju modela koji minimizira maksimalan broj potrebnih segmenata spektra, uvedena

relaksacija ostvaruje dobre performanse kako u pogledu potrebnog vremena rada računara, tako i u preciznosti dobijenih rešenja. Takođe, model koji maksimizira obim saobraćaja koji se može opslužiti određenim brojem segmenata spektra može postići zadovoljavajuća rešenja na osnovu primenjene relaksacije ograničenja alokacije istih segmenata spektra na linkovima. Ipak, za preciznija rešenja u slučaju analize zahtevnijih instanci neophodna je primena drugih tehnika. Pri primeni *greedy* algoritama, kriterijum izbora puta svetlosti je od velikog značaja u slučaju modela koji minimizira maksimalan broj potrebnih segmenata spektra. Rezultati ukazuju i na to da u slučaju modela koji maksimizira obim saobraćaja koji se može opslužiti određenim brojem segmenata spektra, ne postoji dominantan *greedy* algoritam koji treba primeniti. Uslovi u mreži i nivo zagušenja najviše utiču na izbor algoritma, što ukazuje na potrebu za primenom nekog drugog *greedy* algoritma za rešavanje ovog optimizacionog modela [Miy19].

Hibridni model rešavanja RSA koji uzima u obzir karakteristike elastičnih optičkih mreža, ali i održava ciljne nivoe zagušenja na linkovima u mreži, predložen je u [Kha19]. Ciljevi predloženog modela su minimizacija troškova po linku u mreži i minimizacija zagušenja. Model se izvršava u dve faze. U inicijalnoj fazi vrši se *offline* optimizacija rutiranja. Dobijeni rezultati se koriste u narednoj fazi za efikasnu alokaciju spektra. Ovaj optimizacioni model rutira saobraćaj manje opterećenim linkovima u situacijama kada se dostignu vrednosti praga zagušenja na posmatranom linku. Rezultati pokazuju da predloženi RSA algoritam značajno smanjuje verovatnoću blokiranja u mreži u poređenju sa osnovnim varijantama algoritama koji ne uzimaju u obzir zagušenje u mreži [Kha19]. Verovatnoća blokiranja u elastičnim optičkim mrežama, kao i prosečna efikasnost u iskorišćenju linka takođe je analizirana u [Ge19], gde su posmatrane jednostavne metode dinamičke alokacije spektra, kao što su *first-fit* i *next-fit* algoritmi. Rezultati u [Ge19] mogu poslužiti kao osnova za dalje razmatranje i poređenje sa složenijim RSA algoritmima.

U kontekstu obezbeđivanja sadržaja u elastičnim optičkim mrežama preko CDN-a, *cloud*-a, ili *cloud* CDN-a, alokacija sadržaja po *data* centrima je od izuzetnog značaja. Alokacija sadržaja u sistemu videa na zahtev analizirana je u nekoliko studija [App16], [He12], [App13]. Problem alokacije sadržaja u *cloud* okruženju sa posebnim naglaskom

na minimizaciji troškova, ugovoru o kvalitetu servisa, *Service Level Agreement* (SLA), i minimizaciji narušavanja mera performansi analiziran je u [Sal15]. Međutim, rutiranje nije razmatrano u kontekstu alokacije sadržaja u prethodno pomenutim studijama. U [Hab12] je predložena ILP formulacija za rešavanje alokacije sadržaja, rutiranje i zaštitu puta svetlosti. ILP formulacija za rešavanje alokacije sadržaja na *data* centre u *cloud* okruženju, kao i algoritam *Disaster-Aware Dynamic Content Management* (DADCM) predloženi su u [Fer15]. Takođe je prikazana i analiza troškova u takvom sistemu dinamičkog upravljanja sadržajima, zasnovana na realističnim scenarijima. Rezultati pokazuju da predloženi pristup može značajno unaprediti proces dizajniranja mreže u *cloud* okruženju [Fer15]. Alokacija sadržaja zajedno sa RSA problemom u elastičnim optičkim mrežama formulisana je kao ILP model u [Per16]. Takođe, predložena je heuristika, CPRMSA-PD, koja posmatrani problem razlaže na tri odvojena problema: alokaciju sadržaja, agregaciju saobraćaja i RSA. Dostupni sadržaji su podeljeni u grupe sadržaja, a svaka grupa se karakteriše određenom popularnošću. Za razliku od [Gos14a], [Gos15], [Wal14], gde važi pretpostavka da se svi sadržaji nalaze na svakom *data* centru, u [Per16], svaka grupa sadržaja se nalazi najmanje na jednom *data* centru, i može se migrirati na bilo koji *data* centar u skladu sa ograničenjima u pogledu kapaciteta. Svi sadržaji koji se nalaze u posmatranom *data* centru mogu se agregirati i slati ka određenom čvoru u mreži, čak i kada pripadaju drugim grupama sadržaja. Cilj modela predloženog u [Per16] jeste minimizacija broja zauzetih segmenata spektra na bilo kom linku u mreži.

5. PREDLOŽENI MODELI VERTIKALNE INTERKONEKCIJE I TEHNIČKO-EKONOMSKIH RELACIJA IZMEĐU UČESNIKA U BUDUĆEM INTERNETU

U ovom poglavlju doktorske disertacije, predloženi su novi modeli za određivanje odgovarajućih relacija između učesnika u budućem Internetu. U prvom delu, predložen je model za određivanje odgovarajućeg ugovora o interkonekciji između vertikalno integrisanog provajdera SA i provajdera IS u procesu obezbeđivanja sadržaja krajnjim korisnicima uz mogućnost migracije na *cloud*. Zatim, prikazani su modeli za određivanje adekvatnih tarifnih mehanizama za pristup resursima *cloud* provajdera u slučaju vertikalne interkonekcije između vertikalno integrisanog provajdera SA i *cloud* provajdera. Pored toga, predloženi su modeli za određivanje pogodne strategije za pristup neiskorišćenim resursima *cloud* provajdera kroz mehanizme aukcija. Konačno, predložen je model za optimizaciju problema alokacije sadržaja i rutiranja i alokacije spektra u elastičnim optičkim mrežama u okviru procesa obezbeđivanja sadržaja uz mogućnost migracije na *cloud*.

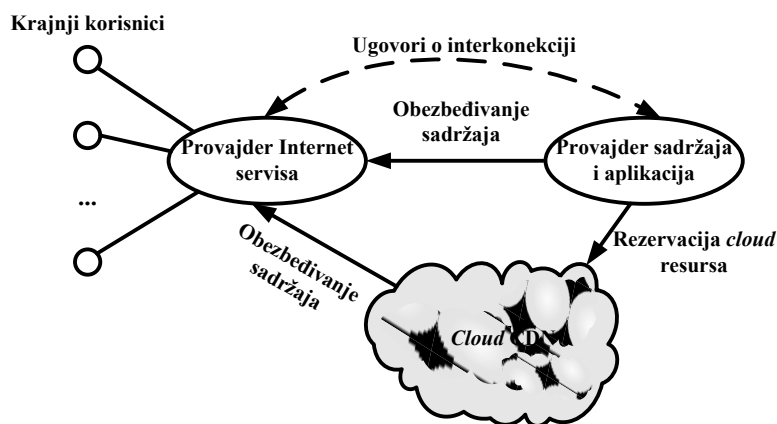
5.1. Modelovanje ugovora o interkonekciji između provajdera sadržaja i aplikacija i provajdera Internet servisa uz mogućnost migracije na *cloud*

Kontinuiran rast Internet saobraćaja uzrokovan je pojavom sadržaja zahtevnih u pogledu propusnog opsega, kao što je video na zahtev, televizija visoke rezolucije, video u realnom vremenu, deljenje fajlova i *Cloud Computing*. Učestvujući sa 80-90% u ukupnom globalnom Internet saobraćaju, obezbeđivanje video sadržaja sa

zadovoljavajućim propusnim opsegom predstavlja veliki izazov [Har15], [Cis19]. Važan parametar u prognoziranju tražnje za obezbeđivanjem sadržaja koji se mora uzeti u obzir pri dimenzionisanju mreže je faktor popularnosti sadržaja. Faktor popularnosti sadržaja može se opisati kao verovatnoća pristupa određenom sadržaju [Avr09]. U literaturi se može naći više predloženih rešenja za modelovanje popularnosti sadržaja: *Zipf* [Zip32], [Har15], *Zipf-Mandelbrot* [Tan07], *stretched exponential* [Guo08], *Zipf with exponential cut-off tail* [Cha07], itd. Adekvatna procena tražnje za propusnim opsegom je od krucijalnog značaja za određivanje ulaganja u izgradnju resursa. Nakon procene tražnje za propusnim opsegom, resursi mreže mogu se alocirati tako da troškovi budu minimizovani. S obzirom da vršna tražnja za propusnim opsegom varira tokom dana, obezbeđivanje sopstvenih resursa koji zadovoljavaju vršnu tražnju predstavlja troškovno neefikasan poslovni potez. Ti resursi bi bili neiskorišćeni u periodima niskog ili normalnog saobraćajnog opterećenja. S druge strane, nedovoljno obezbeđivanje resursa dovodi do odbacivanja zahteva za pristup sadržajima. U cilju minimizacije troškova i unapređenja kvaliteta, provajderi SA treba da razmotre mogućnost uspostavljanja vertikalne interkonekcije sa *cloud* provajderima. Kako bi se omogućio pristup sadržajima, neophodno je uspostaviti vertikalnu interkonekciju između provajdera SA i provajdera IS. U modelu predloženom u [Mik16b], razmatrana su tri ugovora o interkonekciji: *Revenue Sharing* ugovor, *Cost Sharing* ugovor i *Wholesale Price* ugovor.

Pretpostavljeno je se da provajder IS obezbeđuje pristup krajnjim korisnicima po maloprodajnoj mesečnoj ceni koja se zasniva na *flat-rate* tarifnom mehanizmu. U posmatranom vremenskom intervalu, broj krajnjih korisnika provajdera IS je konstantan i označen sa X . Provajder SA je vertikalno integrisan provajder koji skladišti sve originalne video sadržaje u sopstvenim serverima. Na taj način se opslužuje najveći deo zahteva krajnjih korisnika za pristup sadržajima. Određen deo video sadržaja biva migriran na *cloud*. *Cloud* provajder opslužuje zahteve korisnika za pristup sadržajima primenom CDN-a, a sve u cilju obezbeđivanja zadovoljavajućeg iskustvenog kvaliteta. *Cloud* CDN obezbeđuje video sadržaje do provajdera IS koristeći globalnu mrežu. Na taj način, sadržaji se obezbeđuju krajnjim korisnicima uz najbolje moguće performanse. Pretpostavlja se da *cloud* instance i *cloud* CDN poseduje isti *cloud* provajder.

Šematski prikaz procesa obezbeđivanja sadržaja, koji uključuje i mogućnost migracije sadržaja na *cloud* i obuhvata sledeće učesnike: provajdera SA, provajdera IS, *cloud* provajdera i krajnje korisnike, dat je na Slici 5.1.



Slika 5.1 Šematski prikaz procesa obezbeđivanja sadržaja uz mogućnost migracije sadržaja na *cloud*

Svakom sadržaju dodeljuje se faktor popularnosti sadržaja koji uzima vrednosti u opsegu (0, 1) i označava verovatnoću pristupa datom sadržaju. Faktor popularnosti sadržaja određen je primenom Monte Karlo simulacije. U skladu sa uvedenim faktorom popularnosti sadržaja, može se proceniti i ukupna tražnja za propusnim opsegom u procesu obezbeđivanja sadržaja. Bez narušavanja opštosti, analiza se vrši u N uzastopnih vremenskih intervala. Posmatra se parcijalna migracija sadržaja na *cloud*, koja podrazumeva replikaciju dela video sadržaja na *cloud* instance. Uzimajući u obzir ograničen kapacitet provajdera SA u pogledu propusnog opsega, procenjuje se saobraćaj opslužen primenom *cloud* CDN-a. U skladu sa različitim tarifnim mehanizmima *cloud* provajdera, prihodima i alociranim troškovima, analiziraju se tri različita ugovora o interkonekciji između provajdera SA i provajdera IS, i to *Revenue Sharing* ugovor, *Cost Sharing* ugovor i *Wholesale Price* ugovor.

5.1.1. Modelovanje karakteristika zahteva za obezbeđivanje sadržaja

Modelovanje saobraćaja vrši se na nivou komunikacione sesije. Sesija odgovara zahtevu za obezbeđivanje sadržaja. Takvo modelovanje zahteva definisanje intervala međudolazaka zahteva za obezbeđivanje sadržaja i trajanje sesije. Internet saobraćaj odlikuje se sličnim saobraćajnim profilima svakog dana. Broj istovremenih zahteva za obezbeđivanje sadržaja dostiže najvišu vrednost u večernjim časovima tokom dana, dok se najniži broj istovremenih zahteva za obezbeđivanje sadržaja javlja u ranim jutarnjim časovima [Li11], [Che18]. Interval međudolazaka zahteva za obezbeđivanje sadržaja može se opisati Poasonovom raspodelom [Har15]. U svakom vremenskom intervalu, interval međudolazaka zahteva određen je Poasonovom raspodelom sa parametrom $\lambda_i, i = 1, \dots, N$.

Trajanje sadržaja varira od nekoliko sekundi do nekoliko časova. Kratki sadržaji najčešće sadrže marketinške kampanje i reklame. Raspodela trajanja sadržaja može se aproksimirati eksponencijalnom raspodelom [Cho11]. Trajanje sesije je usko vezano za trajanje sadržaja. Stoga, i trajanje sesije može se opisati eksponencijalnom raspodelom za srednjom vrednošću trajanja sadržaja.

Skup svih sadržaja koje obezbeđuje provajder SA označen je sa:

$$V_{ser} = \{v_1, v_2, \dots, v_M\}. \quad (5.1.1)$$

Za svaki sadržaj v_j , uvodi se faktor popularnosti sadržaja ϕ_j , koji predstavlja verovatnoću pristupa sadržaju v_j . Važi:

$$\phi_j \in (0, 1), \sum_{j=1}^M \phi_j = 1. \quad (5.1.2)$$

Pretpostavlja se da postoji pet različitih standarda za pristup svakom sadržaju, $w_k, k \in [1, 5]$. Ti standardi odlikuju se različitim minimalnim zahtevima u pogledu propusnog opsega. Inicirajući zahtev za pristup određenom sadržaju, krajnji korisnik na

slučajan način bira standard u skladu sa diskretnom raspodelom verovatnoća.

Verovatnoća izbora određenog standarda označena je sa p_k , i važi $\sum_{k=1}^5 p_k = 1$.

Zahtevi za obezbeđivanje video sadržaja u svakom vremenskom intervalu generisani su u skladu sa srednjom vrednošću intervala međudolazaka. Specifikacija zahteva za obezbeđivanje sadržaja dobijena je primenom Monte Karlo simulacije u skladu sa faktorom popularnosti sadržaja. Svakom zahtevu za obezbeđivanje video sadržaja dodeljuje se zahtevani propusni opseg u zavisnosti od izabranog standarda, primenom Monte Karlo simulacije. Broj istovremenih sesija po jednom vremenskom intervalu i odgovarajuća tražnja za propusnim opsegom po sesiji određuju ukupnu tražnju za propusnim opsegom po jednom vremenskom intervalu, označenu sa D_i .

Pretpostavlja se da je provajder SA uspostavio vertikalnu integraciju i obezbeđuje sopstvene servere za skladištenje sadržaja. Kako bi se izbegla situacija u kojoj resursi nisu dovoljno iskorišćeni tokom većeg dela dana, kapacitet provajdera SA je ograničen parametrom α . Ovaj parametar određuje udeo u vršnoj vrednosti tražnje za propusnim opsegom po vremenskom intervalu. Stoga, kapacitet provajdera SA može se označiti kao:

$$CP_{server} = \alpha \cdot \max_i(D_i), \alpha \in (0, 1). \quad (5.1.3)$$

Parcijalna migracija na *cloud* predstavlja skladištenje dela najpopularnijih sadržaja na *cloud* resurse u cilju obezbeđivanja pristupa datim sadržajima u situacijama kada tražnja prevazilazi kapacitet provajdera SA. Parametar koji definiše udeo u replikaciji najpopularnijih sadržaja na *cloud* označen je sa β , $\beta \in (0, 1)$. U cilju obezbeđivanja pristupa najpopularnijim sadržajima, provajder SA rezerviše resurse *cloud* provajdera u skladu sa odgovarajućim tarifnim mehanizmom. Pretpostavlja se da je kapacitet za skladištenje sadržaja na *cloud* ograničen karakteristikama izabrane *cloud* instance a dostupni propusni opseg dovoljan za zadovolji sve zahteve tokom perioda visokog saobraćajnog opterećenja. Kada tražnja za propusnim opsegom premaši raspoloživi kapacitet provajdera SA, zahtev za obezbeđivanje sadržaja biće opslužen ukoliko se dati sadržaj nalazi na *cloud*-u. U suprotnom, zahtev za obezbeđivanje sadržaja biće odbijen.

Dakle, udeo u replikaciji sadržaja na *cloud* ima direktan uticaj na odbijanje zahteva za obezbeđivanje sadržaja, što se pre svega odnosi na period visokog saobraćajnog opterećenja.

Ukupan broj generisanih zahteva za obezbeđivanje sadržaja po vremenskom intervalu označen je sa n_t . Stoga, ukupan broj generisanih zahteva može se izraziti na sledeći način:

$$n_t = \sum_{i=1}^N n_i = \sum_{i=1}^N (n_i^{cp} + n_i^{cl} + n_i^{rej}) \quad (5.1.4)$$

Broj zahteva koji su opsluženi od strane provajdera SA po vremenskom intervalu u (5.1.4) označen je sa n_i^{cp} , broj zahteva koji su opsluženi od strane *cloud* CDN-a označen je sa n_i^{cl} i broj odbijenih zahteva za obezbeđivanje sadržaja označen je sa n_i^{rej} .

5.1.2. Ugovori o interkonekciji

U cilju uvida u profite provajdera koji učestvuju u procesu obezbeđivanja sadržaja, analizirana su tri ugovora o interkonekciji: *Revenue Sharing*, *Cost Sharing* i *Wholesale Price*. Pretpostavlja se da je za sve posmatrane ugovore o interkonekciji relacija između provajdera SA i *cloud* provajdera definisana tarifnim mehanizmom rezervacije resursa. Tako, troškovi provajdera SA mogu se izraziti na sledeći način:

$$C^{cp} = \sum_{i=1}^N C_i^{cp} = \sum_{i=1}^N (C_i^{cl} + C_i^{ser}) \quad (5.1.5)$$

$$C_i^{cl} = C_i^{storage} + C_i^{datatransfer} \quad (5.1.6)$$

C_i^{cl} uključuje troškove provajdera SA po vremenskom intervalu za zauzimanje resursa *cloud* provajdera za replikaciju najpopularnijih sadržaja, kao i troškove za obezbeđivanje sadržaja od *cloud* CDN-a do provajdera IS. $C_i^{storage}$ sastoji se iz fiksnih troškova za rezervaciju resursa *cloud* provajdera i troškova po vremenskom intervalu nezavisno od iskorišćenja resursa. Troškovi obezbeđivanja sadržaja od *cloud* CDN-a do

mreže provajdera IS zasnivaju se na obimu prenetih podataka. Ukupan prenos podataka može se izraziti kao:

$$Z = \sum_{i=1}^N z_i, \quad (5.1.7)$$

gde z_i označava obim prenetih podataka po vremenskom intervalu. Kako bi se odredio taj trošak, uvedena je sledeća stepeničasta funkcija:

$$C^{datatransfer} = \sum_{i=1}^N C_i^{datatransfer} = \begin{cases} A_1 Z, & 0 < Z \leq \gamma_1 \\ A_2 Z, & \gamma_1 < Z \leq \gamma_2 \\ \dots \\ A_q Z, & \gamma_{q-1} < Z \leq \gamma_q \end{cases}. \quad (5.1.8)$$

A_1, A_2, \dots, A_q u (5.1.8) predstavljaju fiksne cene za q definisanih pragova u obimu prenetih podataka kada Z uzima vrednosti iz opsega (γ_0, γ_q) . Pretpostavlja se da važi $A_1 > A_2 > \dots > A_q$. C_{ser} uključuje troškove za obezbeđivanje sopstvenih servera provajdera SA, koji se mogu izraziti na sledeći način:

$$C^{ser} = C_i^{ser} = \sum_{i=1}^N c_m^{cp} \cdot n_i^{cp}. \quad (5.1.9)$$

Marginalni troškovi po zahtevu za obezbeđivanje sadržaja i aplikacija od strane provajdera SA označeni su u (5.1.9) sa c_m^{cp} . Prihod provajdera SA definiše se kao rezultat naplate uspostavljene interkonekcije sa provajderom IS. Stoga, zavisnost troškova provajdera IS od primenjenog ugovora o interkonekciji (*Revenue Sharing*, *Cost Sharing* ili *Wholesale Price*) mogu se prikazati kao u (5.1.10), (5.1.11) i (5.1.12), respektivno:

$$C_{sp}^{rs} = \sum_{i=1}^N c_m^{sp} \cdot (n_i^{cp} + n_i^{cl}) + R_{cp}^{rs}, \quad (5.1.10)$$

$$C_{sp}^{cs} = \sum_{i=1}^N c_m^{sp} \cdot (n_i^{cp} + n_i^{cl}) + R_{cp}^{cs}, \quad (5.1.11)$$

$$C_{sp}^{wp} = \sum_{i=1}^N c_m^{sp} \cdot (n_i^{cp} + n_i^{cl}) + R_{cp}^{wp}, \quad (5.1.12)$$

gde c_m^{sp} predstavlja marginalni trošak po zahtevu za obezbeđivanje sadržaja krajnjim korisnicima u mreži provajdera IS.

Pretpostavlja se da postoji L mogućih maloprodajnih *flat-rate* tarifnih mehanizama koji se nude krajnjim korisnicima provajdera IS. Svaki tarifni mehanizam podrazumeva dodeljen minimalni garantovani propusni opseg. Što je veći garantovani propusni opseg, viša je maloprodajna cena p^r . Stoga, prihodi provajdera IS mogu se izraziti na sledeći način:

$$R_{sp} = \sum_{l=1}^L p_l^r \cdot X. \quad (5.1.13)$$

Prihod provajdera SA, u zavisnosti od primenjenog ugovora o interkonekciji sa provajderom IS, može se odrediti kao:

$$R_{cp}^{rs} = \theta \cdot R_{sp}, \quad (5.1.14)$$

$$R_{cp}^{cs} = (1 + \rho + \tau) \cdot C^{cp}, \quad (5.1.15)$$

$$R_{cp}^{wp} = (1 + \rho) \cdot C^{cp}. \quad (5.1.16)$$

Parametar koji predstavlja udeo u prihodima koji dele provajder SA i provajder Internet servisa u slučaju primene *Revenue Sharing* ugovora u (5.1.14) označen je sa θ ; profitna margina u slučaju primene *Cost Sharing* i *Wholesale Price* ugovora u (5.1.15) i (5.1.16) označena je sa ρ , i parametar koji predstavlja udeo u podeli troškova u slučaju primene *Cost Sharing* ugovora u (5.1.16) označen je sa τ . Svaki od ova tri parametra uzima vrednosti u intervalu (0, 1).

Profit provajdera SA može se odrediti oduzimanjem odgovarajućih troškova od prihoda. Dakle, profit provajdera SA u skladu sa odgovarajućim ugovorom o interkonekciji sa provajderom IS može se izraziti kao:

$$\pi_{cp}^{rs} = R_{cp}^{rs} - C^{cp}, \quad (5.1.17)$$

$$\pi_{cp}^{cs} = R_{cp}^{cs} - C^{cp}, \quad (5.1.18)$$

$$\pi_{cp}^{wp} = R_{cp}^{wp} - C^{cp}. \quad (5.1.19)$$

Slično tome, profiti provajdera IS mogu se odrediti iz:

$$\pi_{sp}^{rs} = R_{sp}^{rs} - C_{sp}^{rs}, \quad (5.1.20)$$

$$\pi_{sp}^{cs} = R_{sp}^{cs} - C_{sp}^{cs}, \quad (5.1.21)$$

$$\pi_{sp}^{wp} = R_{sp}^{wp} - C_{sp}^{wp}. \quad (5.1.22)$$

5.1.3. Analiza rezultata

U cilju evaluacije modela, simulacije su izvršene u *open source* programskom jeziku *Python 2.7* u 50 iteracija. Simulira se vremenski interval od 31 dan. Prvi dan svake simulacije predstavlja inicijalni period koji nije uključen u rezultate simulacije. Svaki dan je podeljen na 24 vremenska intervala trajanja 1 čas. Ukupan broj krajnjih korisnika je 100 000. U cilju dobijanja što realističnijih rezultata za modelovanje karakteristika saobraćaja, koristi se 7 različitih parametara Poasonove raspodele za određivanje broja zahteva za obezbeđivanje sadržaja po vremenskom intervalu. Vrednosti parametara Poasonove raspodele prikazane su u Tabeli 5.1. Srednja vrednost parametara Poasonove raspodele daje 2 zahteva za obezbeđivanje sadržaja po sekundi, što odgovara vrednostima zabeleženim u literaturi [Cho11].

Tabela 5.1 Vrednosti parametara Poasonove raspodele za modelovanje zahteva za obezbeđivanje sadržaja

| Parametri Poasonove raspodele | Vrednost parametara |
|-----------------------------------------------------------------|---------------------|
| $\lambda_1=\lambda_{15}=\lambda_{16}=\lambda_{17}=\lambda_{18}$ | 2,33 |
| $\lambda_2=\lambda_{13}=\lambda_{14}$ | 2,00 |
| $\lambda_3=\lambda_{11}=\lambda_{12}$ | 1,67 |
| $\lambda_4=\lambda_8=\lambda_9=\lambda_{10}$ | 1,33 |
| $\lambda_5=\lambda_6=\lambda_7$ | 1,00 |
| $\lambda_{19}=\lambda_{20}=\lambda_{24}$ | 2,67 |
| $\lambda_{21}=\lambda_{22}=\lambda_{23}$ | 3,00 |

Trajanje sesije je aproksimirano eksponencijalnom raspodelom sa srednjom vrednošću trajanja sesije od 30 minuta, što je takođe u skladu sa vrednostima koje se mogu naći u literaturi [Cho11]. Provajder SA obezbeđuje ukupno 500 originalnih sadržaja. Faktor popularnosti sadržaja se na slučajnan način dodeljuje svakom sadržaju, a zatim se

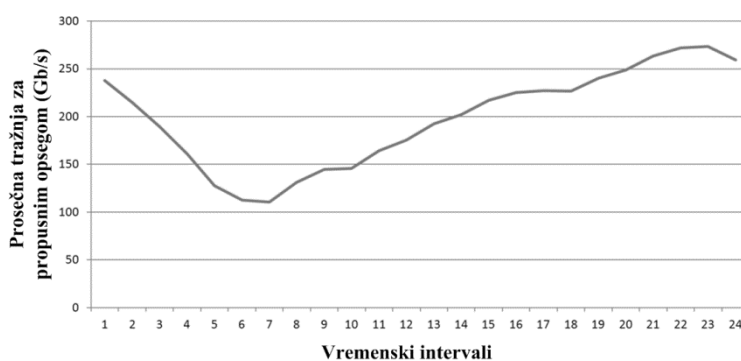
sadržaji sortiraju u zavisnosti od vrednosti faktora popularnosti sadržaja u opadajućem poretku.

Standardi za obezbeđivanje sadržaja i odgovarajući minimalni zahtevi za propusni opseg u skladu su sa vrednostima koje se mogu naći u [Net15], i sumirani su u Tabeli 5.2. Krajnji korisnici na slučajan način biraju standard obezbeđivanja sadržaja u zavisnosti od ograničenja mreže za pristup. Pretpostavljene vrednosti za verovatnoću izbora standarda kvaliteta 1, 2, 3, 4 i 5 su: 0,15; 0,20; 0,30; 0,20 i 0,15; respektivno.

Tabela 5.2 Standardi kvaliteta video sadržaja u pogledu propusnog opsega

| Standard kvaliteta video sadržaja | Minimalni zahtevani propusni opseg (Mb/s) |
|-----------------------------------|-------------------------------------------|
| Standard 1 | 0,5 |
| Standard 2 | 1,5 |
| Standard 3 | 3,0 |
| Standard 4 | 5,0 |
| Standard 5 | 25,0 |

Srednja vrednost tražnje za propusnim opsegom po svakom vremenskom intervalu dobijena je primenom Monte Karlo simulacije. Rezultati te simulacije prikazani su na Slici 5.2.

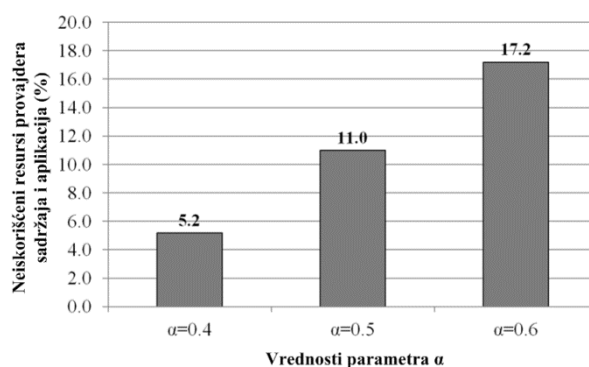


Slika 5.2 Prosečna tražnja za propusnim opsegom po vremenskim intervalima

Obezbeđivanje kapaciteta koji zadovoljavaju vršnu vrednost tražnje za propusnim opsegom nije ekonomski isplativo, a resursi bivaju nedovoljno iskorišćeni u intervalima van vršnog opterećenja. Adekvatna vrednost za kapacitet sopstvenih servera provajdera

sadržaja i aplikacija je između 40% i 60% [Jam13]. Stoga, parametar α u ovoj analizi uzima sledeće vrednosti: $\alpha=0,4$, $\alpha=0,5$, i $\alpha=0,6$.

Iskorišćenje resursa provajdera SA u zavisnosti od parametra α prikazano je na Slici 5.3. Lako je uočiti da što je manji obezbeđeni kapacitet, manje resursa biva nedovoljno iskorišćeno. Takođe, troškovi održavanja tih resursa su manji. Međutim, to može dovesti do povećanja broja odbijenih zahteva za obezbeđivanje sadržaja. Dakle, adekvatno dimenzionisanje kapaciteta provajdera SA je od velikog značaja. Obećavajuće rešenje ovog izazova može biti migracija sadržaja na *cloud*.

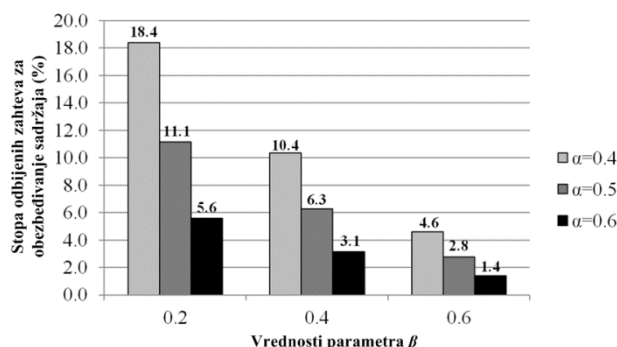


Slika 5.3 Prosečne vrednosti neiskorišćenih kapaciteta provajdera sadržaja i aplikacija

Kako bi se minimizirao rizik od potencijalne neraspoloživosti sadržaja, pretpostavlja se da se migracija sadržaja na *cloud* odvija u periodu niskog opterećenja mreže, tako da *upload* sadržaja na *cloud* ne doprinosi preopterećenju sistema. Vrednosti parametra koji određuje obim parcijalne migracije sadržaja na *cloud* su sledeći: $\beta=0,2$; $\beta=0,4$; i $\beta=0,6$. To znači da je 20%, 40% i 60% najpopularnijih sadržaja migrirano na *cloud*. Replikacija sadržaja obezbeđuje mogućnost pristupanja najpopularnijim sadržajima čak i u periodu visokog opterećenja mreže. Takođe, na taj način se smanjuje broj odbijenih zahteva za obezbeđivanje sadržaja.

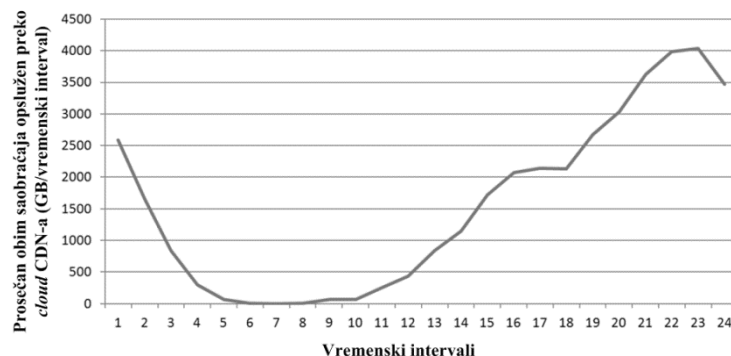
Odbijanje zahteva za obezbeđivanje sadržaja dešava se u situacijama kada je kapacitet provajdera SA popunjen a ne postoji replika zahtevanog sadržaja na *cloud*-u. Termin kapacitet provajdera SA u pogledu propusnog opsega odnosi se na maksimalni propusni opseg koji provajder SA može da obezbedi u datom trenutku. Slika 5.4 pokazuje srednju vrednost broja odbijenih zahteva u zavisnosti od kapaciteta provajdera SA i od obima

migracije sadržaja na *cloud*. Najmanji broj odbijenih zahteva dešava se ukoliko se obezbedi maksimalan kapacitet provajdera SA i ostvari najveći udeo migracije na *cloud*.



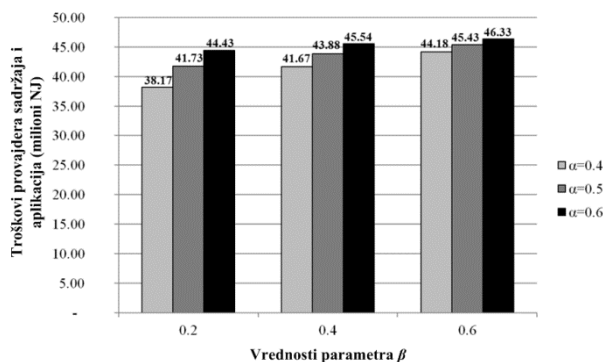
Slika 5.4 Prosečna stopa odbijenih zahteva za obezbeđivanje sadržaja

Kako bi se obezbedilo da *cloud* resursi budu dostupni tokom celog posmatranog perioda, pretpostavlja se da provajder SA rezerviše *cloud* instance po principu tarifnog mehanizma rezervacije. To znači da provajder SA plaća određeni iznos unapred za rezervaciju resursa na *cloud*-u. Taj iznos zavisi od izabranog tarifnog mehanizma rezervacije i odgovarajuće vrste *cloud* instance. *Cloud* provajderi nude različite vrste *cloud* instanci i različite dugoročne ugovore. U cilju izračunavanja troškova provajdera SA na mesečnom nivou, tarifni mehanizam rezervacije i cene prenosa podataka kroz *cloud* CDN preuzete su iz [Ama15]. Pretpostavlja se da je skladišni kapacitet rezervisanih *cloud* instanci dovoljan za opsluživanje zahteva. Srednja vrednost podataka koji se prenose preko *cloud* CDN-a po vremenskom intervalu za sve vrednosti parametara α i β prikazana je na Slici 5.5. U periodu niskog opterećenja mreže, resursi provajdera SA su dovoljni za opsluživanje svih zahteva krajnjih korisnika za obezbeđivanje sadržaja, te stoga obim prenetih podataka kroz *cloud* CDN opada. Međutim, u periodu visokog opterećenja mreže, *cloud* CDN opslužuje značajan broj zahteva za obezbeđivanje sadržaja.



Slika 5.5 Prosečan obim saobraćaja opslužen preko cloud CDN-a

Troškovi provajdera SA u zavisnosti od sopstvenih kapaciteta i obima parcijalne migracije na *cloud*, izraženi u milionima novčanih jedinica (NJ) prikazani su na Slici 5.6. Ti troškovi imaju najnižu vrednost kada parametar β uzima vrednost 0,2, tj. kada se izvršava minimalna migracija na *cloud*, i parametar α uzima vrednost 0,4, odnosno, provajder SA opslužuje samo 40% vršne tražnje. Međutim, stopa odbijenih zahteva za obezbeđivanje sadržaja je viša od 5% za $\beta = 0,2$ i za sve vrednosti parametra α . To znači da tražnja značajno prevazilazi raspoložive kapacitete provajdera SA i *cloud* resursa.



Slika 5.6 Troškovi provajdera sadržaja i aplikacija

U opštem slučaju, troškovi provajdera SA rastu sa povećanjem sopstvenih kapaciteta, što je osnovni motiv za uspostavljanje parcijalne migracije na *cloud*. Slično tome, veći obim migracije na *cloud* dovodi do povećanja troškova. Uzimajući u obzir tražnju, a sve u cilju održavanja stope odbijenih zahteva za obezbeđivanje sadržaja ispod 5%, može se uočiti da bi migraciju na *cloud* trebalo definisati sa $\beta = 0,6$ za sve vrednosti parametra

α , ili $\beta = 0,4$ za $\alpha = 0,6$. Odgovarajuća kombinacija kapaciteta sopstvenih resursa provajdera SA i migracije na *cloud* biće izabrana u skladu sa željenim profitom koji zavisi od primenjenog ugovora o interkonekciji sa provajderom IS.

Profiti provajdera SA u skladu sa primenjenim *Revenue Sharing* ugovorom o interkonekciji prikazani su u Tabeli 5.3. Povećanje udela u podeli prihoda vodi ka snižavanju profita. Veći obim migracije na *cloud* i veći kapacitet sopstvenih resursa povećava troškove, čime se smanjuju profiti.

Tabela 5.3 Profit provajdera sadržaja i aplikacija - *Revenue Sharing* ugovor
(izraženo u milionima novčanih jedinica)

| α | β | Parametar udela u podeli prihoda, θ (%) | | | | |
|----------|---------|------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| | | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 |
| 0,4 | 0,2 | 14,028 | 31,428 | 48,828 | 66,228 | 83,628 |
| | 0,4 | 10,532 | 27,932 | 45,332 | 62,732 | 80,132 |
| | 0,6 | 8,022 | 25,422 | 42,822 | 60,222 | 77,622 |
| 0,5 | 0,2 | 10,470 | 27,870 | 45,270 | 62,670 | 80,070 |
| | 0,4 | 8,320 | 25,720 | 43,120 | 60,520 | 77,920 |
| | 0,6 | 6,772 | 24,172 | 41,572 | 58,972 | 76,372 |
| 0,6 | 0,2 | 7,766 | 25,166 | 42,566 | 59,966 | 77,366 |
| | 0,4 | 6,662 | 24,062 | 41,462 | 58,862 | 76,262 |
| | 0,6 | 5,867 | 23,267 | 40,667 | 58,067 | 75,467 |

Tabela 5.4 prikazuje profit provajdera SA dobijen primenom *Cost Sharing* ugovora o interkonekciji. Profitna margina osigurava određeni deo prihoda provajderu SA. Pored toga, udeo u troškovima ima značajan uticaj na ostvareni profit. Više vrednosti profitne margine utiču na povećanje profita. Slično tome, veći udeo u podeli troškova povećava profit. Međutim, u slučaju primene ovog ugovora o interkonekciji, a za razliku od *Revenue Sharing*-a, povećanje sopstvenih kapaciteta i migracije na *cloud* ne utiče značajno na ostvarene profite. Za fiksne vrednosti udela u podeli troškova uz fiksne profitne margine, profit provajdera SA varira neznatno.

Tabela 5.4 Profit provajdera sadržaja i aplikacija - *Cost Sharing* ugovor (izraženo u milionima novčanih jedinica)

| α, β | ρ | Parametar udela u podeli troškova τ (%) | | | | |
|-------------------------|--------|----------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| | | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 |
| $\alpha=0,4; \beta=0,2$ | 0,3 | 15,269 | 19,086 | 22,903 | 26,720 | 30,537 |
| | 0,4 | 19,086 | 22,903 | 26,720 | 30,537 | 34,355 |
| | 0,5 | 22,903 | 26,720 | 30,537 | 34,355 | 38,172 |
| $\alpha=0,4; \beta=0,4$ | 0,3 | 16,667 | 20,834 | 25,001 | 29,168 | 33,334 |
| | 0,4 | 20,834 | 25,001 | 29,168 | 33,334 | 37,501 |
| | 0,5 | 25,001 | 29,168 | 33,334 | 37,501 | 41,668 |
| $\alpha=0,4; \beta=0,6$ | 0,3 | 17,671 | 22,089 | 26,507 | 30,925 | 35,342 |
| | 0,4 | 22,089 | 26,507 | 30,925 | 35,342 | 39,760 |
| | 0,5 | 26,507 | 30,925 | 35,342 | 39,760 | 44,178 |
| $\alpha=0,5; \beta=0,2$ | 0,3 | 16,692 | 20,865 | 25,038 | 29,211 | 33,384 |
| | 0,4 | 20,865 | 25,038 | 29,211 | 33,384 | 37,557 |
| | 0,5 | 25,038 | 29,211 | 33,384 | 37,557 | 41,730 |
| $\alpha=0,5; \beta=0,4$ | 0,3 | 17,552 | 21,940 | 26,328 | 30,716 | 35,104 |
| | 0,4 | 21,940 | 26,328 | 30,716 | 35,104 | 39,492 |
| | 0,5 | 26,328 | 30,716 | 35,104 | 39,492 | 43,880 |
| $\alpha=0,5; \beta=0,6$ | 0,3 | 18,171 | 22,714 | 27,257 | 31,799 | 36,342 |
| | 0,4 | 22,714 | 27,257 | 31,799 | 36,342 | 40,885 |
| | 0,5 | 27,257 | 31,799 | 36,342 | 40,885 | 45,428 |
| $\alpha=0,6; \beta=0,2$ | 0,3 | 17,774 | 22,217 | 26,661 | 31,104 | 35,547 |
| | 0,4 | 22,217 | 26,661 | 31,104 | 35,547 | 39,991 |
| | 0,5 | 26,661 | 31,104 | 35,547 | 39,991 | 44,434 |
| $\alpha=0,6; \beta=0,4$ | 0,3 | 18,215 | 22,769 | 27,323 | 31,876 | 36,430 |
| | 0,4 | 22,769 | 27,323 | 31,876 | 36,430 | 40,984 |
| | 0,5 | 27,323 | 31,876 | 36,430 | 40,984 | 45,538 |
| $\alpha=0,6; \beta=0,6$ | 0,3 | 18,533 | 23,167 | 27,800 | 32,433 | 37,067 |
| | 0,4 | 23,167 | 27,800 | 32,433 | 37,067 | 41,700 |
| | 0,5 | 27,800 | 32,433 | 37,067 | 41,700 | 46,333 |

Ostvareni profit provajdera SA u slučaju primene *Wholesale Price* ugovora o interkonekciji prikazan je u Tabeli 5.5. Rezultate primene ovog ugovora o interkonekciji jednostavno je porediti sa *Cost Sharing* ugovorom o interkonekciji, s obzirom da je isti parametar, profitna margina, od značaja za obe vrste ugovora. Kao što je već naglašeno, više vrednosti profitne margine vode ka višim vrednostima profita. Obezbeđivanje kapaciteta ima manju ulogu u slučaju primene ovog ugovora o interkonekciji. Međutim, profit neznatno raste sa povećanjem sopstvenih kapaciteta i povećanjem obima migracije na *cloud*.

Tabela 5.5 Profit provajdera sadržaja i aplikacija - Wholesale Price ugovor (izraženo u milionima novčanih jedinica)

| α | β | Profitna margina, ρ | | |
|----------|---------|--------------------------|--------|--------|
| | | 0,3 | 0,4 | 0,5 |
| 0,4 | 0,2 | 11,452 | 15,269 | 19,086 |
| | 0,4 | 12,500 | 16,667 | 20,834 |
| | 0,6 | 13,253 | 17,671 | 22,089 |
| 0,5 | 0,2 | 12,519 | 16,692 | 20,865 |
| | 0,4 | 13,164 | 17,552 | 21,940 |
| | 0,6 | 13,628 | 18,171 | 22,714 |
| 0,6 | 0,2 | 13,330 | 17,774 | 22,217 |
| | 0,4 | 13,661 | 18,215 | 22,769 |
| | 0,6 | 13,900 | 18,533 | 23,167 |

Profit provajdera IS ostvaren primenom *Revenue Sharing* ugovora o interkonekciji prikazan je u Tabeli 5.6. U skladu sa očekivanim, fiksni prihodi tokom posmatranog perioda uz rastući udeo u podeli prihoda smanjuju profit provajdera IS. Proširenje obezbeđenih resursa smanjuje profite, kako provajdera SA, tako i provajdera IS.

Tabela 5.6 Profit provajdera Internet servisa - Revenue Sharing ugovor (izraženo u milionima novčanih jedinica)

| α | β | Parametar udela u podeli prihoda, θ (%) | | | | |
|----------|---------|------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| | | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 |
| 0,4 | 0,2 | 83,720 | 66,320 | 48,920 | 31,520 | 14,120 |
| | 0,4 | 79,974 | 62,574 | 45,174 | 27,774 | 10,374 |
| | 0,6 | 77,285 | 59,885 | 42,485 | 25,085 | 7,685 |
| 0,5 | 0,2 | 80,345 | 62,945 | 45,545 | 28,145 | 10,745 |
| | 0,4 | 78,079 | 60,679 | 43,279 | 25,879 | 8,479 |
| | 0,6 | 76,446 | 59,046 | 41,646 | 24,246 | 6,846 |
| 0,6 | 0,2 | 77,745 | 60,345 | 42,945 | 25,545 | 8,145 |
| | 0,4 | 76,610 | 59,210 | 41,810 | 24,410 | 7,010 |
| | 0,6 | 75,795 | 58,395 | 40,995 | 23,595 | 6,195 |

Profit provajdera IS u slučaju primene *Cost Sharing* ugovora o interkonekciji prikazan je u Tabeli 5.7. Povećanje udela u podeli troškova smanjuje profit. Više vrednosti profitne margine provajdera SA takođe smanjuju profit.

Tabela 5.7 Profit provajdera Internet servisa - Cost Sharing ugovor (izraženo u milionima novčanih jedinica)

| α, β | ρ | Parametar udela u podeli troškova τ (%) | | | | |
|-------------------------|--------|----------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| | | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 |
| $\alpha=0,4; \beta=0,2$ | 0,3 | 82,480 | 78,663 | 74,846 | 71,028 | 67,211 |
| | 0,4 | 78,663 | 74,846 | 71,028 | 67,211 | 63,394 |
| | 0,5 | 74,846 | 71,028 | 67,211 | 63,394 | 59,577 |
| $\alpha=0,4; \beta=0,4$ | 0,3 | 73,839 | 69,672 | 65,506 | 61,339 | 57,172 |
| | 0,4 | 69,672 | 65,506 | 61,339 | 57,172 | 53,005 |
| | 0,5 | 65,506 | 61,339 | 57,172 | 53,005 | 48,838 |
| $\alpha=0,4; \beta=0,6$ | 0,3 | 67,636 | 63,218 | 58,800 | 54,382 | 49,964 |
| | 0,4 | 63,218 | 58,800 | 54,382 | 49,964 | 45,547 |
| | 0,5 | 58,800 | 54,382 | 49,964 | 45,547 | 41,129 |
| $\alpha=0,5; \beta=0,2$ | 0,3 | 74,123 | 69,950 | 65,777 | 61,603 | 57,430 |
| | 0,4 | 69,950 | 65,777 | 61,603 | 57,430 | 53,257 |
| | 0,5 | 65,777 | 61,603 | 57,430 | 53,257 | 49,084 |
| $\alpha=0,5; \beta=0,4$ | 0,3 | 68,846 | 64,458 | 60,070 | 55,682 | 51,294 |
| | 0,4 | 64,458 | 60,070 | 55,682 | 51,294 | 46,906 |
| | 0,5 | 60,070 | 55,682 | 51,294 | 46,906 | 42,518 |
| $\alpha=0,5; \beta=0,6$ | 0,3 | 65,047 | 60,504 | 55,961 | 51,419 | 46,876 |
| | 0,4 | 60,504 | 55,961 | 51,419 | 46,876 | 42,333 |
| | 0,5 | 55,961 | 51,419 | 46,876 | 42,333 | 37,790 |
| $\alpha=0,6; \beta=0,2$ | 0,3 | 67,737 | 63,293 | 58,850 | 54,406 | 49,963 |
| | 0,4 | 63,293 | 58,850 | 54,406 | 49,963 | 45,520 |
| | 0,5 | 58,850 | 54,406 | 49,963 | 45,520 | 41,076 |
| $\alpha=0,6; \beta=0,4$ | 0,3 | 65,058 | 60,504 | 55,950 | 51,397 | 46,843 |
| | 0,4 | 60,504 | 55,950 | 51,397 | 46,843 | 42,289 |
| | 0,5 | 55,950 | 51,397 | 46,843 | 42,289 | 37,735 |
| $\alpha=0,6; \beta=0,6$ | 0,3 | 63,128 | 58,495 | 53,862 | 49,228 | 44,595 |
| | 0,4 | 58,495 | 53,862 | 49,228 | 44,595 | 39,962 |
| | 0,5 | 53,862 | 49,228 | 44,595 | 39,962 | 35,328 |

Kao što je prikazano u Tabeli 5.8, primenom *Wholesale Price* ugovora o interkonekciji profit provajdera IS opada za veće vrednosti profitne margine provajdera SA. Viši troškovi provajdera SA usled obezbeđivanja sopstvenih resursa takođe utiču na profit provajdera IS.

Tabela 5.8 Profit provajdera Internet servisa - Wholesale Price ugovor (izraženo u milionima novčanih jedinica)

| α | β | Profitna margina, ρ | | |
|----------|---------|--------------------------|--------|--------|
| | | 0,3 | 0,4 | 0,5 |
| 0,4 | 0,2 | 86,297 | 82,480 | 78,663 |
| | 0,4 | 78,006 | 73,839 | 69,672 |
| | 0,6 | 72,053 | 67,636 | 63,218 |
| 0,5 | 0,2 | 78,296 | 74,123 | 69,950 |
| | 0,4 | 73,234 | 68,846 | 64,458 |
| | 0,6 | 69,590 | 65,047 | 60,504 |
| 0,6 | 0,2 | 72,180 | 67,737 | 63,293 |
| | 0,4 | 69,612 | 65,058 | 60,504 |
| | 0,6 | 67,762 | 63,128 | 58,495 |

Rezultati simulacija migracije na *cloud* primenom svih analiziranih ugovora o interkonekciji ukazuju na izvesne zakonitosti u vrednosti ostvarenih profita za sve analizirane varijante obima obezbeđivanja sopstvenih resursa i migracije na *cloud*. Analiza stope odbijenih zahteva za obezbeđivanje sadržaja i iskorišćenosti resursa pokazuje da je migracija na *cloud* poželjna u svim analiziranim scenarijima. Isti zaključak može se izvesti i analizom troškova provajdera SA, kao i provajdera IS. U skladu s tim, za sve analizirane vrednosti parametara α i β , *Revenue Sharing* ugovor o interkonekciji obezbeđuje najviši profit provajderu SA, sa udelom u podeli prihoda od 70%, 60% i 50%. Sledeći prihvatljiv ugovor o interkonekciji za provajdera SA bio bi *Cost Sharing* ugovor sa udelom u podeli troškova od 50% i profitnom marginom od 40% ili 50%, odnosno sa udelom u podeli troškova od 40% i profitnom marginom od 50%. Analizom preostalih uslova, *Revenue Sharing* ugovor o interkonekciji sa udelom u podeli prihoda od 40% obezbeđuje najviši profit u odnosu na sva ostala moguća rešenja.

Pozicija provajdera IS je potpuno suprotna u odnosu na provajdera SA. Sledeći zaključci važe za sve analizirane kombinacije obima obezbeđenih sopstvenih resursa provajdera SA i obima migracije na *cloud*. Lako se može uočiti da primenom bilo kog ugovora o interkonekciji, provajder IS neće poslovati sa gubicima. Stoga, bilo koji ugovor o interkonekciji može obezbediti povraćaj troškova. *Wholesale Price* ugovor o interkonekciji obezbeđuje viši profit u poređenju sa ostalim vrstama ugovora o interkonekciji. U skladu sa očekivanjem, *Revenue Sharing* ugovor sa udelom u podeli

prihoda od 50%, 60% i 70% obezbeđuje najniže profite. Ukoliko provajder IS definiše profitnu marginu od, na primer, 30%, ovi udeli u podeli prihoda neće zadovoljiti zahteve. *Cost Sharing* ugovor koji je prihvatljiv ugovor o interkonekciji za provajdera SA, takođe neće biti prihvatljivo rešenje za provajdera IS. Međutim, *Revenue Sharing* ugovor sa udelom u podeli prihoda od 40% zadovoljava ograničenje od 40% profitne margine provajdera IS. Dakle, analiza profita provajdera SA i provajdera IS pokazuje da se *Revenue Sharing* ugovor o interkonekciji sa udelom u podeli prihoda od 40% može smatrati srednje-efikasnim rešenjem za oba provajdera.

5.2. Model za određivanje odgovarajućeg tarifnog mehanizma za pristup resursima *cloud* provajdera od strane provajdera sadržaja i aplikacija

U ovom delu doktorske disertacije analizirani su različiti tarifni mehanizmi *cloud* provajdera. Analiza obuhvata određivanje troškova vertikalno integrisanog provajdera SA u procesu obezbeđivanja sadržaja krajnjim korisnicima uz mogućnost migracije na *cloud*. Predložen je hibridni model čiji je cilj minimizacija troškova, sa posebnim osvrtom na stopu odbijenih zahteva za obezbeđivanje sadržaja. Za potrebe određivanja troškova vertikalno integrisanog provajdera SA u procesu obezbeđivanja sadržaja koji podrazumeva mogućnost parcijalne migracije na *cloud*, analizirana su dva tarifna mehanizma koje nudi *cloud* provajder za obezbeđivanje svojih resursa: tarifiranje na zahtev i rezervacija. Bez narušavanja opštosti, pretpostavlja se da sve *cloud* instance imaju iste hardverske i softverske karakteristike. Kapacitet *cloud* instance označen se sa φ . Modelovanje karakteristika zahteva za obezbeđivanje sadržaja identično je kao u poglavlju 5.1.1 ove doktorske disertacije.

5.2.1. Troškovi provajdera sadržaja i aplikacija

Troškovi vertikalno integrisanog provajdera SA u procesu obezbeđivanja sadržaja sa mogućnošću parcijalne migracije na *cloud* mogu se podeliti na:

- troškove za opsluživanje dela zahteva za obezbeđivanje sadržaja sopstvenim resursima i
- troškove za obezbeđivanje resursa *cloud* provajdera.

Cloud instance se zauzimaju u zavisnosti od sledećih faktora:

- prognozirane tražnje za obezbeđivanje sadržaja,
- neophodnih kapaciteta za migraciju dela najpopularnijih sadržaja na *cloud* i
- ponuđenih tarifnih mehanizama *cloud* provajdera.

Dakle, troškovi provajdera SA sastoje se iz:

- troškova rezervacije resursa, ukoliko je omogućen tarifni mehanizam rezervacije,
- troškova u zavisnosti od iskorišćenja *cloud* resursa koji su izraženi kao fiksni iznos po obračunskom intervalu i
- troškova za prenos podataka od *cloud* CDN-a do krajnjih korisnika.

Kao što je već naglašeno, trošak za obezbeđivanje sadržaja od *cloud* CDN-a do mreže provajdera IS zavisi od obima prenetih podataka. U skladu sa [Mik16b], za određivanje troškova uvedena je sledeća stepeničasta funkcija:

$$C_{cp}^{cl} = \sum_{i=1}^N \sum_{l=1}^U C_{i,l}^{cl} = \begin{cases} A_1 Z, & 0 < Z \leq \gamma_1 \\ A_2 Z, & \gamma_1 < Z \leq \gamma_2 \\ \dots \\ A_q Z, & \gamma_{q-1} < Z \leq \gamma_q \end{cases}, \quad (5.2.1)$$

gde A_1, A_2, \dots, A_q predstavljaju fiksne cene za q definisanih pragova u obimu prenetih podataka, kada Z uzima vrednosti iz opsega $(0, \gamma_q)$. Pretpostavlja se da važi

$A_1 > A_2 > \dots > A_q$. U jednakosti (5.2.1), U označava ukupan broj zauzetih *cloud* instanci tokom posmatranog vremenskog intervala, što podrazumeva sve rezervisane i *cloud* instance na zahtev, tj. $U = U_r + U_o$. Ukoliko provajder SA zauzima *cloud* instance na zahtev i bez dugoročne ugovorne obaveze, primenjen je tarifni mehanizam na zahtev. Troškovi provajdera SA mogu se izraziti na sledeći način:

$$C_{cp}^o = \sum_{i=1}^N c_m^{cp} \cdot n_i^{cp} + \sum_{g=1}^{U_o} (\sigma_g \cdot p_o) + C_{cp}^{cl}, \quad (5.2.2)$$

gde je ukupan broj obračunskih intervala tokom kojih su korišćeni resursi *cloud* instance g označen sa σ_g , p_o označava fiksnu cenu po obračunskom intervalu u slučaju primene tarifnog mehanizma na zahtev. Ukoliko provajder SA primenjuje takvu poslovnu politiku da samo rezerviše resurse *cloud* provajdera, bez mogućnosti zauzimanja tih resursa na zahtev, troškovi se mogu izraziti na sledeći način:

$$C_{cp}^r = \sum_{i=1}^N c_m^{cp} \cdot n_i^{cp} + \sum_{f=1}^{U_r} (\psi_f + \sigma_f \cdot p_r) + C_{cp}^{cl}, \quad (5.2.3)$$

gde je ukupan broj obračunskih intervala tokom kojih se koriste resursi rezervisane *cloud* instance f označen sa σ_f , ψ_f predstavlja iznos za naplatu rezervacije resursa *cloud* instance f . Fiksna cena po obračunskom intervalu u slučaju primene tarifnog mehanizma rezervacije označena je sa p_r , i važi $p_r < p_o$.

Pored prethodno analiziranih tarifnih mehanizama, u [Mik17b] predložen je hibridni tarifni mehanizam koji podrazumeva i rezervaciju resursa *cloud* provajdera ali dozvoljava i mogućnost zauzimanja resursa na zahtev u cilju redukcije troškova, kao i redukcije stope odbijenih zahteva za obezbeđivanje sadržaja. Provajder SA rezerviše određen broj *cloud* instanci sa ugovornom obavezom, i po potrebi dodatno iznajmljuje instance *cloud* provajdera na zahtev. Ove instance na zahtev se iznajmljuju u slučaju da kapacitet rezervisanih *cloud* instanci nije dovoljan za skladištenje dela najpopularnijih sadržaja. Stoga, troškovi u slučaju primene hibridnog tarifnog mehanizma mogu se prikazati kao:

$$C_{cp}^h = \sum_{i=1}^N c_m^{cp} \cdot n_i^{cp} + \sum_{e=0}^{U_r^h} (\psi_e^h + \sigma_e^h \cdot p_r) + \sum_{s=0}^{U_o^h} (\sigma_s^h \cdot p_o) + C_{cp}^{cl}, \quad (5.2.4)$$

gde

- ψ_e^h označava trošak rezervacije resursa u slučaju primene hibridnog tarifnog mehanizma;
- σ_e^h označava ukupan broj obračunskih intervala tokom kojih se koriste resursi rezervisane *cloud* instance e ;
- ukupan broj obračunskih intervala tokom kojih se koriste resursi *cloud* instance na zahtev s označen je sa σ_s^h ;
- broj rezervisanih *cloud* instanci je U_e^h i
- broj *cloud* instanci na zahtev je U_s^h .

5.2.2. Analiza rezultata

U cilju analize predloženog modela za obračun troškova provajdera sadržaja i aplikacija, vršene su simulacije u *open source* programskom jeziku *Python 2.7* u 100 iteracija. Osnovne postavke simulacije su istovetne sa prethodno opisanim u modelima za određivanje odgovarajućeg ugovora o interkonekciji [Mik16b]: posmatra se vremenski period od 31 dan, pri čemu rezultati prvog dana nisu uzeti u razmatranje; svaki dan je podeljen na 24 vremenska intervala trajanja 1 čas. Ukupan broj krajnjih korisnika provajdera IS je 100 000.

Parametri Poasonove raspodele za definisanje dolaznih zahteva za obezbeđivanje sadržaja po vremenskom intervalu su sledeći: $\lambda_1=\lambda_{15}=\lambda_{16}=\lambda_{17}=\lambda_{18}=2,33$; $\lambda_2=\lambda_{13}=\lambda_{14}=2$; $\lambda_3=\lambda_{11}=\lambda_{12}=1,67$; $\lambda_4=\lambda_8=\lambda_9=\lambda_{10}=1,33$; $\lambda_5=\lambda_6=\lambda_7=1$; $\lambda_{19}=\lambda_{20}=\lambda_{24}=2,67$; $\lambda_{21}=\lambda_{22}=\lambda_{23}=3$. Za aproksimaciju trajanja sesije primenjuje se eksponencijalna raspodela sa srednjom vrednošću od 30 minuta [Cho11]. Pretpostavlja se da postoji $M=500$ originalnih sadržaja. Veličina svakog sadržaja određuje se na slučajan način. Faktor popularnosti sadržaja svakog sadržaja određuje se na dnevnom nivou primenom Monte Karlo

simulacije, a zatim se sadržaji sortiraju prema opadajućoj vrednosti faktora popularnosti sadržaja.

Standardi za obezbeđivanje sadržaja i odgovarajući zahtevani propusni opsezi su sledeći [Net15]:

- standard 1 - 0,5 Mb/s,
- standard 2 - 1,5 Mb/s,
- standard 3 - 3 Mb/s,
- standard 4 - 5 Mb/s i
- standard 5 - 25 Mb/s.

Verovatnoće izbora svakog standarda su sledeće: 0,15; 0,20; 0,30; 0,20 i 0,15; respektivno [Mik16b]. U skladu sa [Mik16b], vrednosti parametra α u ovoj analizi su: $\alpha = 0,4$; $\alpha = 0,5$ i $\alpha = 0,6$.

Pretpostavlja se da se migracija sadržaja na *cloud* odvija u periodu niskog opterećenja, kako bi se smanjilo opterećenje mreže. Na taj način se takođe minimizira rizik od nemogućnosti pristupa sadržaju. Pretpostavljene vrednosti faktora migracije sadržaja na *cloud* su sledeće: $\beta = 0,2$; $\beta = 0,4$ i $\beta = 0,6$. Po pretpostavci, sve *cloud* instance imaju isti kapacitet, $\varphi = 512 GB$ [Mik17b].

Rezultati simulacija prikazani su u Tabelama 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13 i 5.14. Troškovi provajdera SA izraženi su u hiljadama novčanih jedinica, dok je stopa odbijenih zahteva za obezbeđivanje sadržaja izražena u procentima.

U tabelama su korišćene sledeće oznake:

- R predstavlja stopu odbijenih zahteva za obezbeđivanje sadržaja,
- π označava maksimalan broj raspoloživih *cloud* instanci na zahtev (na slučajaj način se bira broj od 0 do π), što uključuje mogućnost neraspoloživosti *cloud* instanci u datom momentu, pa provajder SA mora uzeti u obzir taj rizik,
- ω označava broj rezervisanih *cloud* instanci.

Troškovi provajdera SA u slučaju primene tarifnog mehanizma na zahtev, tarifnog mehanizma rezervacije i hibridnog tarifnog mehanizma prikazani su u Tabelama 5.9, 5.11 i 5.13, respektivno. Slično tome, stopa odbijenih zahteva za obezbeđivanje sadržaja u slučaju primene tarifnog mehanizma na zahtev, tarifnog mehanizma rezervacije i hibridnog tarifnog mehanizma prikazana je u Tabelama 5.10, 5.12 i 5.14, respektivno.

Tabela 5.9 Troškovi provajdera sadržaja i aplikacija - tarifni mehanizam na zahtev
(izraženo u hiljadama novčanih jedinica)

| π | α, β | | | | | | | | |
|-------|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 0,4; 0,2 | 0,4; 0,4 | 0,4; 0,6 | 0,5; 0,2 | 0,5; 0,4 | 0,5; 0,6 | 0,6; 0,2 | 0,6; 0,4 | 0,6; 0,6 |
| 5 | 70 | 71 | 71 | 74 | 75 | 75 | 77 | 78 | 78 |
| 10 | 71 | 73 | 74 | 75 | 77 | 77 | 78 | 79 | 79 |
| >10 | 72 | 76 | 78 | 76 | 78 | 80 | 78 | 80 | 81 |

Tabela 5.10 Stopa odbijenih zahteva za obezbeđivanje sadržaja - tarifni mehanizam na zahtev

| π | α, β | | | | | | | | |
|-------|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 0,4; 0,2 | 0,4; 0,4 | 0,4; 0,6 | 0,5; 0,2 | 0,5; 0,4 | 0,5; 0,6 | 0,6; 0,2 | 0,6; 0,4 | 0,6; 0,6 |
| 5 | 13 | 12 | 12 | 8 | 7 | 7 | 4 | 4 | 4 |
| 10 | 12 | 10 | 9 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 3 |
| >10 | 11 | 7 | 3 | 7 | 4 | 2 | 3 | 2 | 1 |

Tabela 5.11 Troškovi provajdera sadržaja i aplikacija - tarifni mehanizam rezervacije
(izraženo u hiljadama novčanih jedinica)

| ω | α, β | | | | | | | | |
|----------|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 0,4; 0,2 | 0,4; 0,4 | 0,4; 0,6 | 0,5; 0,2 | 0,5; 0,4 | 0,5; 0,6 | 0,6; 0,2 | 0,6; 0,4 | 0,6; 0,6 |
| 4 | 73 | 74 | 74 | 77 | 77 | 77 | 79 | 80 | 80 |
| 6 | 74 | 77 | 77 | 77 | 79 | 79 | 80 | 81 | 81 |
| 8 | 74 | 77 | 79 | 78 | 80 | 81 | 81 | 82 | 82 |

Tabela 5.12 Stopa odbijenih zahteva za obezbeđivanje sadržaja - tarifni mehanizam rezervacije

| ω | α, β | | | | | | | | |
|----------|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 0,4; 0,2 | 0,4; 0,4 | 0,4; 0,6 | 0,5; 0,2 | 0,5; 0,4 | 0,5; 0,6 | 0,6; 0,2 | 0,6; 0,4 | 0,6; 0,6 |
| 4 | 11 | 10 | 10 | 7 | 6 | 6 | 3 | 3 | 3 |
| 6 | 11 | 7 | 7 | 7 | 4 | 4 | 3 | 2 | 2 |
| 8 | 11 | 6 | 4 | 7 | 4 | 2 | 3 | 2 | 1 |

Tabela 5.13 Troškovi provajdera sadržaja i aplikacija - hibridni tarifni mehanizam
(izraženo u hiljadama novčanih jedinica)

| ω | π | α, β | | | | | | | | |
|----------|-------|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | 0,4; 0,2 | 0,4; 0,4 | 0,4; 0,6 | 0,5; 0,2 | 0,5; 0,4 | 0,5; 0,6 | 0,6; 0,2 | 0,6; 0,4 | 0,6; 0,6 |
| 4 | 5 | 73 | 76 | 77 | 77 | 79 | 79 | 79 | 81 | 81 |
| | 10 | 73 | 76 | 78 | 77 | 79 | 80 | 79 | 81 | 82 |
| | >10 | 73 | 77 | 80 | 77 | 79 | 81 | 79 | 81 | 82 |
| 6 | 5 | 74 | 77 | 79 | 77 | 80 | 81 | 80 | 81 | 82 |
| | 10 | 74 | 77 | 79 | 77 | 80 | 81 | 80 | 81 | 82 |
| | >10 | 74 | 77 | 80 | 77 | 80 | 82 | 80 | 81 | 83 |
| 8 | 5 | 74 | 77 | 80 | 78 | 80 | 82 | 81 | 82 | 83 |
| | 10 | 74 | 77 | 80 | 78 | 80 | 82 | 81 | 82 | 83 |
| | >10 | 74 | 77 | 80 | 78 | 80 | 82 | 81 | 82 | 83 |

Tabela 5.14 Stopa odbijenih zahteva za obezbeđivanje sadržaja - hibridni tarifni mehanizam

| ω | π | α, β | | | | | | | | |
|----------|-------|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | | 0,4; 0,2 | 0,4; 0,4 | 0,4; 0,6 | 0,5; 0,2 | 0,5; 0,4 | 0,5; 0,6 | 0,6; 0,2 | 0,6; 0,4 | 0,6; 0,6 |
| 4 | 5 | 11 | 7 | 6 | 7 | 4 | 4 | 3 | 2 | 2 |
| | 10 | 11 | 7 | 5 | 7 | 4 | 3 | 3 | 2 | 1 |
| | >10 | 11 | 6 | 3 | 7 | 4 | 2 | 3 | 2 | 1 |
| 6 | 5 | 11 | 6 | 4 | 7 | 4 | 2 | 3 | 2 | 1 |
| | 10 | 11 | 6 | 3 | 7 | 4 | 2 | 3 | 2 | 1 |
| | >10 | 11 | 6 | 3 | 7 | 4 | 2 | 3 | 2 | 1 |
| 8 | 5 | 11 | 6 | 3 | 7 | 4 | 2 | 3 | 2 | 1 |
| | 10 | 11 | 6 | 3 | 7 | 4 | 2 | 3 | 2 | 1 |
| | >10 | 11 | 6 | 3 | 7 | 4 | 2 | 3 | 2 | 1 |

U opštem slučaju, kada provajder SA obezbeđuje više sopstvenih kapaciteta, troškovi rastu ali vrednosti stope odbijenih zahteva za obezbeđivanje sadržaja opadaju čak ispod 5% (što se može smatrati ciljnom vrednoću za stopu odbijenih zahteva za obezbeđivanje sadržaja) u svim razmatranim tarifnim mehanizmima. Što je veći kapacitet iznajmljenih resursa *cloud* provajdera, troškovi su viši, ali je istovremeno značajno niža stopa odbijenih zahteva za obezbeđivanje sadržaja. Ova tvrdnja važi za sve analizirane tarifne mehanizme. Tarifni mehanizam na zahtev obezbeđuje najniže troškove uz najvišu stopu odbijenih zahteva za obezbeđivanje sadržaja. Tarifni mehanizam rezervacije zahteva sklapanje dugoročnih ugovora i u opštem slučaju dovodi do viših troškova u poređenju sa tarifnim mehanizmom na zahtev. Lako je uočiti da rezervacija resursa snižava stopu

odbijenih zahteva za obezbeđivanje sadržaja. Hibridni tarifni mehanizam obezbeđuje troškove uporedive sa troškovima tarifnog mehanizma rezervacije, ali takođe obezbeđuje i zadovoljavajuće vrednosti stope odbijenih zahteva za obezbeđivanje sadržaja. Te vrednosti su manje od 5% čak i za manje kapacitete sopstvenih resursa provajdera SA. Dakle, hibridni tarifni mehanizam može unaprediti zadovoljstvo krajnjih korisnika uz prihvatljive troškove provajdera SA.

5.3. Modelovanje mehanizma pristupa neiskorišćenim resursima *cloud* provajdera u vidu *spot* instanci primenom aukcija

Tarifiranje i alokacija neiskorišćenih resursa *cloud* provajdera najčešće se sprovodi kroz različite mehanizme aukcija. U ovom delu doktorske disertacije, analizira se situacija u kojoj *cloud* provajder nudi svoje neiskorišćene resurse u vidu *spot* instanci primenom aukcija. Polazna pretpostavka je da sve *spot* instance imaju iste karakteristike u pogledu kapaciteta. Analiza se može jednostavno proširiti za različite tipove *spot* instanci. Svaki korisnik *cloud* resursa kreira ponudu u cilju ostvarivanja pristupa određenoj *spot* instanci. Ponuda predstavlja maksimalnu cenu po obračunskom intervalu koju je korisnik *cloud* resursa spreman da plati za datu *spot* instancu. Bez gubitka opštosti, analiza je podeljena na N uzastopnih vremenskih intervala. Svaki vremenski interval ekvivalentan je jednom obračunskom intervalu *cloud* provajdera. Broj dostupnih *spot* instanci varira u zavisnosti od promene broja iniciranih i oslobođenih rezervisanih i instanci *cloud* provajdera na zahtev. To u najvećoj meri zavisi od tražnje za pristupom *cloud* resursima. S obzirom na to da se opsluživanje korisničkih zahteva za pristup resursima *cloud* provajdera može modelovati Poasonovom raspodelom [Mik16b], broj dostupnih *spot* instanci takođe se može modelovati Poasonovom raspodelom. Pretpostavlja se da je broj dostupnih *spot* instanci po vremenskom intervalu određen parametrima λ_h i λ_l u periodima visokog i niskog opterećenja u mreži, respektivno. Skup dostupnih *spot* instanci tokom vremenskog intervala i označen je sa

$S^i = \left\{ s_1^i, s_2^i, \dots, s_{|S^i|}^i \right\}$. Pretpostavlja se da korisnici *cloud* resursa definišu svoje ponude

na početku svakog vremenskog intervala. Takođe, pretpostavlja se da svaki korisnik *cloud* resursa kreira ponudu za jednu *spot* instancu. S obzirom na to da je potreban dovoljan broj učesnika na tržištu da bi se postigla maksimizacija prihoda u dugom roku [Bar15], pretpostavlja se da je broj *cloud* korisnika uvek veći od broja dostupnih *spot* instanci. Skup ponuda korisnika *cloud* resursa u vremenskom intervalu i , $i \in [1, N]$,

označen je sa $B^i = \left\{ b_1^i, b_2^i, \dots, b_{|B^i|}^i \right\}$, pri čemu važi $b_1^i > b_2^i > \dots > b_{|B^i|}^i$. Broj korisnika

cloud resursa koji kreiraju ponude određen je na slučajan način.

Korisnici *cloud* resursa, po pravilu, nisu upoznati sa vrednostima *spot* cena unapred. Međutim, cene po obračunskom intervalu za ekvivalentnu *cloud* instancu pri mehanizmu rezervacije i tarifnom mehanizmu na zahtev, poznate su unapred i označene sa p_r i p_o , respektivno.

5.3.1. Izbor strategije za formiranje ponuda u procesu aukcija

U zavisnosti od njihove spremnosti da plate, korisnici *cloud* resursa mogu birati sledeće strategije pri kreiranju ponude:

- vrednosti ponude su približno jednake ceni rezervacije *cloud* instance,
- vrednosti ponude su približno jednake ceni *cloud* instance na zahtev,
- vrednosti ponude su veće ili jednake od cene *cloud* instance na zahtev.

Kada korisnici *cloud* resursa definišu vrednosti ponude koje su približno jednake ceni rezervacije *cloud* resursa, njihove ponude mogu biti prikazane kao $b_j^i \in [p_r - \delta_r, p_r + \delta_r]$, $i \in [1, N]$, $j \in [1, |B^i|]$, gde δ_r predstavlja malo odstupanje od cene rezervacije po obračunskom intervalu. Verovatnoća izbora prve strategije pri definisanju ponude označena je sa q_1 , $q_1 \in (0,1)$.

Ponude korisnika *cloud* resursa u slučaju izbora druge strategije mogu se prikazati kao $b_k^i \in [p_o - \delta_o^l, p_o)$, $i \in [1, N]$, $k \in [1, |B^i|]$, $k \neq j$, gde δ_o^l označava donju granicu u odstupanju od cene *cloud* instance na zahtev po obračunskom intervalu. Verovatnoća izbora druge strategije označena je sa $q_2, q_2 \in (0,1)$.

U slučaju kada korisnici *cloud* resursa biraju treću strategiju, njihove ponude mogu se prikazati kao $b_l^i \in [p_o, p_o + \delta_o^u]$, $i \in [1, N]$, $l \in [1, |B^i|]$, $l \neq k \neq j$. U ovom slučaju, δ_o^u označava gornju granicu u odstupanju od cene instance na zahtev po obračunskom intervalu. U skladu sa prethodnim strategijama, verovatnoća izbora treće strategije označena je sa $q_3, q_3 \in (0,1)$, i važi $q_1 + q_2 + q_3 = 1$.

S obzirom na to da su sve *spot* instance alocirane korisnicima *cloud* resursa u prvoj rundi, analiziraju se aukcije sa više objekata, gde $|S|$ najviših ponuda pobeđuje u aukciji. Skup svih korisnika koji pobeđuju u aukciji u vremenskom intervalu i , označen je kao $W^i = \{w_1^i, w_2^i, \dots, w_{|S^i|}^i\}$, $i \in [1, N]$, a skup odgovarajućih ponuda koje obezbeđuju pravo pristupa resursima je označen je kao $B^{iw} = \{b_1^i, b_2^i, \dots, b_{|S^i|}^i\}$.

5.3.2. Modelovanje prihoda cloud provajdera

U cilju dobijanja uvida u prihode *cloud* provajdera ostvarenih kroz mehanizme aukcija, u [Mik17c] analizirana su tri scenarija.

Scenario 1: analizira se primena uniformne aukcije, u kojoj svi korisnici sa ponudama koje obezbeđuju pravo pristupa resursima u aukciji plaćaju istu cenu, koja je jednaka najnižoj dobitnoj ponudi. Skup isplata korisnika koji ostvaruju pravo pristupa resursima u aukciji u vremenskom intervalu i označen je sa $P^{iI} = \{p_1^{iI}, p_2^{iI}, \dots, p_{|S^i|}^{iI}\}$, $i \in [1, N]$.

U ovom scenariju, važi sledeće: $p_1^{iI} = p_2^{iI} = \dots p_{|S^i|}^{iI} = b_{|S^i|}^i$. Stoga, prihodi *cloud* provajdera u slučaju primene uniformne aukcije mogu se izračunati primenom sledeće formule:

$$R^I = \sum_{i=1}^N P^{iI} = \sum_{i=1}^N |S^i| \cdot b_{|S^i|}^i \quad (5.3.1)$$

Scenario 2: *cloud* provajder primenjuje generalizovanu *second-price* aukciju, u kojoj korisnici sa ponudama koje obezbeđuju pravo pristupa resursima plaćaju iznos u vrednosti sledeće najviše ponude. Dakle, skup isplata korisnika koji ostvaruju pravo pristupa resursima u vremenskom intervalu i može se označiti kao

$$P^{iII} = \left\{ p_1^{iII}, p_2^{iII}, \dots, p_{|S^i|}^{iII} \right\}, \quad i \in [1, N], \quad \text{pri čemu važi}$$

$$p_1^{iII} = b_2^i, p_2^{iII} = b_3^i, \dots, p_{|S^i|}^{iII} = b_{|S^i|+1}^i. \text{ Prihod } \textit{cloud} \textit{ provajdera u slučaju primene ovog}$$

mehanizma aukcije može se prikazati kao:

$$R^{II} = \sum_{i=1}^N P^{iII} = \sum_{i=1}^N \sum_{m=2}^{|S^i|+1} b_{|S^i|+1}^i \quad (5.3.2)$$

Scenario 3: analizira se primena generalizovane *third-price* aukcije. U posmatranom scenariju, korisnik sa najvišom ponudom koja obezbeđuje pravo pristupa resursima plaća iznos koji je jednak trećoj po redu najvišoj ponudi; korisnik sa drugom najvišom ponudom koja obezbeđuje pravo pristupa resursima plaća iznos koji je jednak četvrtom po redu, i tako dalje. Skup isplata korisnika koji ostvaruju pravo pristupa resursima u

$$\text{vremenskom intervalu } i \text{ može se označiti kao } P^{iIII} = \left\{ p_1^{iIII}, p_2^{iIII}, \dots, p_{|S^i|}^{iIII} \right\}, \quad i \in [1, N],$$

$$\text{pri čemu važi } p_1^{iIII} = b_3^i, p_2^{iIII} = b_4^i, \dots, p_{|S^i|}^{iIII} = b_{|S^i|+2}^i. \text{ Stoga, prihod } \textit{cloud} \textit{ provajdera u}$$

slučaju primene ovog scenarija može se odrediti primenom sledeće formule:

$$R^{III} = \sum_{i=1}^N P^{iIII} = \sum_{i=1}^N \sum_{m=2}^{|S^i+2|} b_{|S^i+2|}^i \quad (5.3.3)$$

5.3.3. Analiza rezultata

U cilju analize prethodno opisanih scenarija, vršene su simulacije u 1000 iteracija u programskom jeziku Python 2.7. Posmatran je vremenski period od $N=24$ vremenska intervala trajanja od 1h. Vremenskim intervalima od $i=7$ do $i=20$ pripada period visokog opterećenja u mreži [Jia15]. U skladu s tim, vremenski intervali $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ i $i = 21, 22, 23, 24$ čine period niskog opterećenja u mreži. Pretpostavlja se da *cloud* provajder poseduje 10 instanci ukupno. Pretpostavljene vrednosti za parametre Poasonove raspodele za period visokog i niskog opterećenja u mreži su $\lambda_h = 1.5$ i $\lambda_l = 4$, respektivno [Mik17c]. Parametar λ_l ima višu vrednost od parametra λ_h zbog činjenice da u periodu visokog opterećenja u mreži manje *cloud* resursa biva neiskorišćeno. Samim tim je i broj dostupnih *spot* instanci manji. Za potrebe adekvatnog poređenja cena po obračunskom intervalu, korišćeni su podaci za instancu *m4.10xlarge cloud* provajdera *Amazona*, za *US east* region. Cene po obračunskom intervalu za tarifne mehanizme rezervacije i cene instance na zahtev su $p_r = 2,996$ \$ po satu i $p_o = 3,84$ \$ po satu, respektivno [Ama17]. Imajući u vidu vrednosti ovih cena po obračunskom intervalu, opravdano je pretpostaviti da vrednosti parametara koji određuju granice za odgovarajuće strategije kreiranja ponuda iznose: $\delta_r = 0,1 \cdot p_r$, $\delta_o^l = 0,1 \cdot p_o$ i $\delta_o^u = 0,1 \cdot p_o$. Prema [Kar15], verovatnoća da korisnici *cloud* resursa biraju treću strategiju pri izboru strategije je $q_3 = 0,35$. U skladu s tim, pretpostavljene vrednosti za verovatnoće izbora prve i druge strategije su $q_1 = 0,25$ i $q_2 = 0,4$, respektivno. U svakoj iteraciji simulacije, određuje se srednja vrednost *spot* cene po vremenskom intervalu za svaki posmatrani scenario. Dobijeni rezultati se porede sa srednjim vrednostima ponuda koje obezbeđuju pravo pristupa resursima, kao što je prikazano u Tabeli 5.15.

Rezultati pokazuju da je srednja vrednost *spot* cena po vremenskom intervalu viša u periodu visokog opterećenja u mreži (u vremenskim intervalima 7-20). Ovakvi rezultati su posledica činjenice da u periodu visokog opterećenja u mreži postoji manje dostupnih *spot* instanci, pa stoga, ponude sa višim vrednostima dobijaju u procesu aukcije. Ovo važi za sve posmatrane scenarije i sve vremenske intervale.

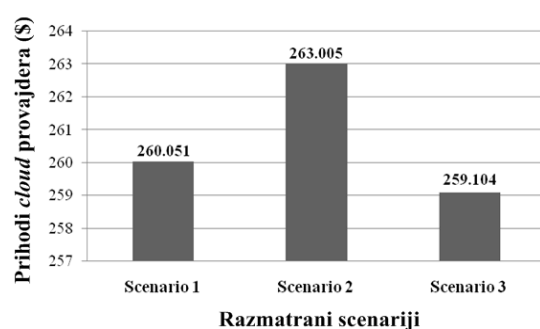
Tabela 5.15 Prosečne vrednosti *spot* cena po vremenskom intervalu

| Vremenski interval | Prosečna ponuda koja obezbeđuje pristup resursima | Prosečna vrednost <i>spot</i> cene Scenario 1 | Prosečna vrednost <i>spot</i> cene Scenario 2 | Prosečna vrednost <i>spot</i> cene Scenario 3 |
|--------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 1 | 4,064 | 3,966 | 4,005 | 3,949 |
| 2 | 4,061 | 3,963 | 4,001 | 3,944 |
| 3 | 4,062 | 3,961 | 4,003 | 3,945 |
| 4 | 4,056 | 3,952 | 3,997 | 3,939 |
| 5 | 4,059 | 3,956 | 3,998 | 3,939 |
| 6 | 4,060 | 3,957 | 4,000 | 3,941 |
| 7 | 4,135 | 4,107 | 4,077 | 4,017 |
| 8 | 4,134 | 4,106 | 4,075 | 4,019 |
| 9 | 4,131 | 4,103 | 4,072 | 4,012 |
| 10 | 4,138 | 4,109 | 4,077 | 4,014 |
| 11 | 4,139 | 4,111 | 4,079 | 4,017 |
| 12 | 4,141 | 4,113 | 4,083 | 4,023 |
| 13 | 4,137 | 4,108 | 4,078 | 4,019 |
| 14 | 4,139 | 4,113 | 4,079 | 4,018 |
| 15 | 4,131 | 4,104 | 4,072 | 4,014 |
| 16 | 4,133 | 4,106 | 4,075 | 4,015 |
| 17 | 4,133 | 4,107 | 4,075 | 4,015 |
| 18 | 4,137 | 4,110 | 4,079 | 4,020 |
| 19 | 4,138 | 4,112 | 4,078 | 4,018 |
| 20 | 4,135 | 4,107 | 4,076 | 4,016 |
| 21 | 4,067 | 3,967 | 4,008 | 3,948 |
| 22 | 4,059 | 3,956 | 3,998 | 3,937 |
| 23 | 4,061 | 3,958 | 4,001 | 3,943 |
| 24 | 4,061 | 3,959 | 4,003 | 3,942 |

Treba naglasiti i to da za sve posmatrane scenarije i sve vremenske intervale važi da je *spot* cena viša od cene *cloud* instancu na zahtev. Ovakva situacija je u najvećoj meri posledica mogućnosti izbora treće strategije pri kreiranju ponude (kreiranje vrednosti ponude čija vrednost je viša od cene instance na zahtev kako bi se sprečilo terminiranje

spot instance pre završetka započete sesije). Neki *cloud* provajderi čak promovišu izbor treće strategije [Kar15]. Kao posledica toga, *spot* cene rastu. Najniže cene u svim vremenskim intervalima ostvaruju se primenom generalizovane *third-price* aukcije (Scenario 3). Rezultati sumirani u Tabeli 5.15 takođe ukazuju na to da su srednje vrednosti *spot* cena u periodu visokog opterećenja u mreži u slučaju primene uniformne aukcije (Scenario 1) najpribližnije odgovarajućim prosečnim ponudama koje obezbeđuju pravo pristupa resursima. *Spot* cene u periodu niskog opterećenja u mreži u slučaju primene generalizovane *second-price* aukcije (Scenario 2) najpribližnije su prosečnim ponudama koje obezbeđuju pravo pristupa resursima u odgovarajućim vremenskim intervalima. Dakle, u pogledu podsticaja korisnika *cloud* resursa da kreiraju istinite ponude, tj. ponude koje su zaista spremni da plate a da pri tome ne pokušavaju zaštititi se od terminiranja instance pre završetka započete sesije i tako kreirati ponude viših vrednosti, nema generalnog rešenja.

Prosečni prihodi *cloud* provajdera ostvareni u tri posmatrana scenarija prikazani su na Slici 5.7.



Slika 5.7 Prosečni prihodi cloud provajdera

Može se uočiti da primena generalizovane *second-price* aukcije (Scenario 2) obezbeđuje najviše prihode. Takođe, uočljivo je da je zanemarljiva razlika u ostvarenim prihodima u slučaju Scenarija 1 i Scenarija 3. Dakle, pokazalo se da je trenutno najzastupljeniji mehanizam uniformnih aukcija manje efikasan od generalizovane *second-price* aukcije u pogledu maksimizacije prihoda. Međutim, nema značajne razlike u visini prihoda u posmatranim scenarijima. Iz tog razloga, analizu treba proširiti dodatnim parametrima, kao što su dostupnost i raspoloživost *spot* instanci.

5.4. Modelovanje mehanizma pristupa neiskorišćenim resursima *cloud* provajdera u vidu *spot block* instanci primenom aukcija

Novija varijanta *spot* instanci - *spot block* instance ima mogućnost garantovanja kontinuiranog pristupa *cloud* resursima u trajanju od najviše šest sati bez terminiranja. U nastavku je predložen model za definisanje *spot block* cena. Data je analiza različitih strategija definisanja ponuda u različitim mehanizmima aukcija, kao i analiza prihoda *cloud* provajdera u zavisnosti od primenjenog mehanizma aukcije.

Posmatra se sistem u kojem *cloud* provajder nudi svoje neiskorišćene resurse kroz mehanizme aukcija. Polazi se od pretpostavke da sve *cloud* instance imaju iste računarske karakteristike. Analiza se jednostavno može proširiti i za različite tipove *cloud* instanci. Bez gubitka opštosti, analiza je podeljena na N uzastopnih vremenskih intervala trajanja jednog časa. Broj dostupnih *cloud* instanci koje se mogu ponuditi u formi *spot block* instanci varira u zavisnosti od broja iniciranih i terminiranih rezervisanih, *cloud* instanci na zahtev, *spot* instanci i *spot block* instanci koje su već inicirane. Taj broj u najvećoj meri zavisi od tražnje za pristupom resursima *cloud* provajdera. Ukupan broj instanci *cloud* provajdera označen je sa M . Pretpostavlja se da svaka instanca u svakom vremenskom intervalu (izuzev ako je već inicirana kao *spot block* instanca) može biti inicirana kao rezervisana, instanca na zahtev ili *spot* instanca. To znači da data instanca ne može biti dostupna za inicijaciju u formi *spot block* instance. Verovatnoća da je neka *cloud* instanca neraspoločiva označena je sa Q . S obzirom na to da je potreban dovoljan broj učesnika na tržištu za maksimizaciju prihoda u dugom roku [Bar15], pretpostavlja se da je broj korisnika *cloud* resursa, koji je označen sa B , uvek veći od broja dostupnih instanci koje mogu biti inicirane kao *spot block* instance. Broj korisnika koji zahtevaju iniciranje *spot block* instance može se modelovati primenom Poasonove raspodele [Mik16b]. Dva parametra Poasonove

raspodele, λ_1 i λ_2 , korišćena su za modelovanje perioda visokog i niskog opterećenja u mreži, respektivno.

U cilju iniciranja određenog skupa *spot block* instanci, korisnici *cloud* resursa kreiraju ponudu. Pri kreiranju ponude, definišu se dva parametra: vrednost ponude (maksimalna cena po času koju su korisnici spremni da plate za dati *spot block*) i vreme rada *spot block* instanci, koje može biti maksimalno 6 časova u kontinuitetu. Ponude se kreiraju na početku svakog vremenskog intervala. *Cloud* provajder alokira raspoložive *spot block* instance, označene kao M_i , $M_i \leq M$, korisnicima koji ih najviše vrednuju. Korisnici sa najvišim ponudama mogu inicirati instance koje će moći da koriste bez terminiranja za unapred definisano vreme. Vrednost koju korisnici plaćaju za iniciranje *spot block* instanci nije vrednost ponude, već vrednost *spot block* cene po času. U zavisnosti od primenjenog mehanizma aukcije, te cene mogu imati različite vrednosti.

5.4.1. Modelovanje *spot block* cena

Cene *spot block* instanci imaju različite vrednosti u zavisnosti od trajanja rada. Cena *spot block* instance po jednom času u vremenskom intervalu $i \in [1, N]$ za *spot block* instancu trajanja t , označena je sa $p_{i,t}$, $t = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$. Ove cene nisu poznate unapred. Njihove vrednosti u tekućem vremenskom intervalu zavise od ponuda korisnika *cloud* resursa i primenjenog mehanizma aukcije. Ipak, javno su dostupne cene *spot block* instanci za prethodni vremenski interval $i-1$, $p_{i-1,1}$ i $p_{i-1,6}$ [Ama18b]. Cene *spot block* instanci imaju najvišu vrednost ako je trajanje rada bez terminiranja *spot block* instanci 6 časova, a najnižu za trajanje *spot block*-a od 1 časa. Dakle, važi sledeće:

$$p_{i-1,1} < p_{i-1,2} < p_{i-1,3} < p_{i-1,4} < p_{i-1,5} < p_{i-1,6} \quad (5.4.1)$$

spot block cene za trajanje rada instanci od 2, 3, 4 i 5 časova u vremenskom intervalu $i-1$ mogu se jednostavno izračunati na osnovu poznatih cena $p_{i-1,1}$ i $p_{i-1,6}$. Pri tom, pretpostavlja se da važi:

$$p_{i-1,6} = (1 + \theta) \cdot p_{i-1,1}, \quad \theta \in (0,1) \quad (5.4.2)$$

Parametar θ uveden je u cilju određivanja razlike između vrednosti cene *spot block* instance po času za trajanje rada od 1 časa i 6 časova. Stoga, cene *spot block* instanci za trajanje rada t mogu se odrediti pomoću sledeće jednakosti:

$$p_{i-1,t} = \left(1 + \frac{(t-1) \cdot \theta}{5}\right) \cdot p_{i-1,1}, \quad t = \{2, 3, 4, 5\} \quad (5.4.3)$$

5.4.2. Strategije kreiranja ponuda korisnika cloud resursa

Korisnici *cloud* resursa kreiraju svoje ponude u vremenskom intervalu $i \in [1, N]$ na osnovu informacija o cenama *cloud* instanci na zahtev i cenama *spot block* instanci po času u prethodnim vremenskim intervalima. Cene *cloud* instanci na zahtev za ekvivalentne instance (instance sa istim računarskim karakteristikama koje se nude kroz tarifiranje na zahtev) označene su kao p_o . Skup svih korisnika koji kreiraju ponude u vremenskom intervalu $i \in [1, N]$ označen je kao B_i . Ponuda korisnika *cloud* resursa $j \in B_i$ u vremenskom intervalu $i \in [1, N]$ može se prikazati na sledeći način:

$$b_{i,j} = (v_{j,t_j}^i, t_j^i) \quad (5.4.4)$$

gde v_{j,t_j} predstavlja vrednost ponude za trajanje rada *spot block* instanci od t_j .

U zavisnosti od svoje spremnosti da plate, korisnici *cloud* resursa mogu izabrati sledeće strategije:

- kreiranje ponuda čija vrednost je približno jednaka ceni *spot block* instance za jedan čas koja je važila u prethodnom vremenskom intervalu, $p_{i-1,1}$,
- kreiranje ponuda čija vrednost je približno jednaka ceni *spot block* instance za šest časova koja je važila u prethodnom vremenskom intervalu, $p_{i-1,6}$,
- kreiranje ponude čija vrednost je približno jednaka ceni ekvivalentne instance na zahtev.

Ove strategije se biraju u skladu sa diskretnom raspodelom verovatnoća.

Kada korisnici *cloud* resursa kreiraju ponude čije su vrednosti približno jednake ceni *spot block* instance za jedan čas koja je važila u prethodnom vremenskom intervalu, te vrednosti su u sledećem opsegu:

$$b_{i,k} \in [p_{i-1,1} - \delta_1, p_{i-1,1} + \delta_1] \quad (5.4.5)$$

za $i \in [1, N]$ i $k \in [1, |B_i|]$. δ_1 označava malo odstupanje od cene *spot block* instance za trajanje rada od jednog časa u prethodnom vremenskom intervalu. Verovatnoća izbora prve strategije označena je sa $q_1, q_1 \in (0,1)$.

U slučaju izbora druge strategije važi sledeće:

$$b_{i,l} \in [p_{i-1,6} - \delta_6, p_{i-1,6} + \delta_6] \quad (5.4.6)$$

gde $i \in [1, N]$ i $l \in [1, |B_i|], l \neq k$. δ_6 označava malo odstupanje od cene *spot block* instance za trajanje rada od 6 časova u prethodnom vremenskom intervalu. Verovatnoća izbora druge strategije označena je sa $q_2, q_2 \in (0,1)$.

U slučaju izbora treće strategije pri kreiranju ponuda, vrednosti ponuda nalaze se u sledećem opsegu:

$$b_{i,m} \in [p_o - \delta_o, p_o] \quad (5.4.7)$$

pri čemu je $i \in [1, N]$ i $m \in [1, |B_i|], m \neq l \neq k$. δ_o označava donju granicu u odstupanju od cene *cloud* instance na zahtev po času za ekvivalentnu instancu. Verovatnoća izbora druge strategije označena je sa $q_3, q_3 \in (0,1)$ i važi $q_1 + q_2 + q_3 = 1$.

5.4.3. Mehanizmi aukcija za obezbeđivanje pristupa *spot block* instancama *cloud* provajdera

Poređenje ponuda u mehanizmu aukcija u slučaju alokacije *spot block* instanci složenije je u odnosu na poređenje ponuda u slučaju alokacije regularnih *spot* instanci. Složenost je povećana usled karakteristika *spot block* instanci da rade bez terminiranja čak i kada cene postanu više od vrednosti ponuda. S obzirom na to da se cene *spot block* instanci razlikuju u zavisnosti od zahtevanog vremena rada bez terminiranja, ponude se ne mogu jednostavno sortirati u zavisnosti od njihove vrednosti. U [Mik18a], predložen je model za translaciju ponuda u jedinične ponude, a sve u cilju omogućavanja njihovog poređenja u procesu aukcije. Svaka ponuda biva izražena novom vrednošću, sa istim trajanjem rada bez terminiranja, i to na sledeći način:

$$\overline{b_{i,j}} = \left(\overline{v_{j,t_j}^i}, t_j \right) \quad (5.4.8)$$

gde $\overline{v_{j,t_j}^i}$ predstavlja vrednost jedinične ponude korisnika *cloud* resursa *j* u vremenskom intervalu $i \in [1, N]$. U skladu s (5.4.3), vrednost jedinične ponude može se izračunati na osnovu sledeće formule:

$$\overline{v_{j,t_j}^i} = \begin{cases} \frac{5 \cdot v_{j,t_j}^i}{5 + (t_j^i - 1) \cdot \theta}, & t_j^i = \{2, 3, 4, 5, 6\} \\ v_{j,t_j}^i, & t_j^i = 1 \end{cases} \quad (5.4.9)$$

Nakon određivanja jediničnih ponuda u jednom vremenskom intervalu, alokacija *spot block* instanci vrši se na osnovu skupa ponuda koje obezbeđuju pravo pristupa resursima, odnosno, korisnici sa tim ponudama mogu inicirati zahtevane *spot block* instance. Iznosi koje korisnici *cloud* resursa plaćaju zavise od primenjenog mehanizma aukcije. U cilju određivanja prihoda *cloud* provajdera u procesu obezbeđivanja pristupa *spot block* instancama, analiziraju se sledeća dva mehanizma aukcija: uniformna aukcija i generalizovana *second-price* aukcija. Skup ponuda koje dobijaju u procesu aukcije sadrži M_i najviših jediničnih ponuda,

$$W_i^I = \left\{ \overline{v_{1,t_1}^i}, \overline{v_{2,t_2}^i}, \dots, \overline{v_{M_i,t_{M_i}}^i} \right\} \quad (5.4.10)$$

gde M_i označava broj raspoloživih *spot block* instanci u vremenskom intervalu $i \in [1, N]$. Ovaj broj varira usled mogućnosti da *spot block* instance budu zauzete bez terminiranja do 6 časova. U slučaju primene uniformne aukcije, svaki korisnik koji dobija u aukciji plaća isti iznos koji je jednak najnižoj ponudi koja dobija u procesu aukcije.

Skup iznosa na naplatu korisnicima *cloud* resursa u vremenskom intervalu $i \in [1, N]$ u slučaju primene uniformne aukcije je:

$$P_i^I = \left\{ \overline{v_{1,t_1}^i}, \overline{v_{2,t_2}^i}, \dots, \overline{v_{M_i,t_{M_i}}^i} \right\} \quad (5.4.11)$$

gde važi $\overline{v_{1,t_1}^i} > \overline{v_{2,t_2}^i} > \dots > \overline{v_{M_i,t_{M_i}}^i}$. Stoga, *spot block* cena za trajanje rada *spot block* instance od jednog časa bez terminiranja u vremenskom intervalu $i \in [1, N]$ je $p_{i,1}^I = \overline{v_{M_i,t_{M_i}}^i}$. U skladu sa (5.4.3), cene *spot block* instanci u opštem slučaju mogu se odrediti na osnovu:

$$p_{i,t}^I = \left(1 + \frac{(t-1) \cdot \theta}{5} \right) \cdot p_{i,1}^I \quad (5.4.12)$$

gde važi $t = \{2, 3, 4, 5, 6\}$.

Prihod *cloud* provajdera u slučaju primene uniformne aukcije u vremenskom intervalu može se izračunati pomoću:

$$R_i^I = \sum_{q=1}^{|W_i^I|} p_{i,t_q}^I + \sum_{h=1}^{|W_{i-1}^I|} p_{i-1,t_h}^I + \sum_{z=1}^{|W_{i-2}^I|} p_{i-2,t_z}^I + \sum_{e=1}^{|W_{i-3}^I|} p_{i-3,t_e}^I + \sum_{g=1}^{|W_{i-4}^I|} p_{i-4,t_g}^I + \sum_{r=1}^{|W_{i-5}^I|} p_{i-5,t_r}^I \quad (5.4.13)$$

gde $t_h \geq 2$, $t_z \geq 3$, $t_e \geq 4$, $t_g \geq 5$, $t_r = 6$. W_{i-1}^I označava skup ponuda koje obezbeđuju pravo pristupa resursima u vremenskom intervalu $i-1$, W_{i-2}^I označava skup ponuda koje obezbeđuju pravo pristupa resursima u vremenskom intervalu $i-2$, itd. Jednakost (5.4.13) ukazuje na to da prihod *cloud* provajdera u jednom vremenskom intervalu zavisi od cena *spot block* instanci u posmatranom vremenskom intervalu, ali i od cena za *spot block* instance koje su inicirane u prethodnih pet vremenskih intervala sa odgovarajućim trajanjem bez terminiranja (u vremenskom intervalu $i-5$ relevantni zahtevi su oni sa trajanjem od 6 časova, u vremenskom intervalu $i-4$ relevantni zahtevi su oni čije trajanje je veće ili jednako 5 časova, itd.).

Kada *cloud* provajder primenjuje generalizovanu *second-price* aukciju, korisnici sa ponudama koje dobijaju u procesu aukcije plaćaju iznos koji je jednak vrednosti sledeće najviše ponude. To znači da svaki korisnik *cloud* resursa ima različit skup mogućih iznosa za naplatu. Najpre se određuje skup jediničnih ponuda za svakog korisnika. Cene *spot block* instanci za svakog korisnika koji ostvaruje mogućnost pristupa resursima određuju se na osnovu jediničnih ponuda korisnika koji nudi sledeću najvišu vrednost jedinične ponude. Skup iznosa na naplatu korisnicima *cloud* resursa u vremenskom intervalu $i \in [1, N]$ u slučaju primene generalizovane *second-price* aukcije može se prikazati kao:

$$P_i^H = \left\{ \overline{v_{2,t_2}^i}, \overline{v_{3,t_3}^i}, \dots, \overline{v_{M_i+1,t_{M_i+1}}^i} \right\} \quad (5.4.14)$$

gde važi $\overline{v_{2,t_2}^i} > \overline{v_{3,t_3}^i} > \dots > \overline{v_{M_i+1,t_{M_i+1}}^i}$.

U tom slučaju, cene *spot block* instanci po jednom času za korisnika *cloud* resursa $q \in W_i^H$ mogu se prikazati na sledeći način:

$$p_{i,t_q}^H = \left(1 + \frac{(t_q - 1) \cdot \theta}{5} \right) \cdot \overline{v_{q+1,t_{q+1}}^i} \quad (5.4.15)$$

gde je $t_q = \{2, 3, 4, 5, 6\}$, a $\overline{v_{q+1,t_{q+1}}^i}$ predstavlja sledeću najvišu jediničnu ponudu. S obzirom na to da korisnici *cloud* resursa plaćaju različite cene *spot block* instanci,

pretpostavlja se da je unapred poznata vrednost najniže jedinične ponude koje obezbeđuju pravo pristupa resursima u prethodnom vremenskom intervalu. Te informacije olakšavaju proces donošenja odluka pri izboru odgovarajuće strategije za izbor vrednosti ponude.

U skladu sa (5.4.13), prihod *cloud* provajdera u slučaju primene generalizovane *second-price* aukcije u vremenskom intervalu $i \in [1, N]$ može se prikazati na sledeći način:

$$\begin{aligned}
 R_i^{II} = & \sum_{q=1}^{|W_i^{II}|} p_{i,t_q}^{II} + \sum_{h=1}^{|W_{i-1}^{II}|} p_{i-1,t_h}^{II} + \sum_{z=1}^{|W_{i-2}^{II}|} p_{i-2,t_z}^{II} + \\
 & + \sum_{e=1}^{|W_{i-3}^{II}|} p_{i-3,t_e}^{II} + \sum_{g=1}^{|W_{i-4}^{II}|} p_{i-4,t_g}^{II} + \sum_{r=1}^{|W_{i-5}^{II}|} p_{i-5,t_r}^{II}
 \end{aligned} \tag{5.4.16}$$

5.4.4. Analiza rezultata

U cilju analize predloženih scenarija, vršene su simulacije u programskom jeziku *Python* 2.7 u 1000 iteracija. Posmatran je vremenski period od 5 dana (od ponedeljka do petka). Svaki dan je podeljen u $N=24$ vremenskih intervala trajanja od jednog časa. Vremenski intervali od $i=7$ do $i=20$ čine period visokog opterećenja u mreži [Jia15]. Broj korisnika koji kreiraju zahteve za inicijaciju *spot block* instanci u periodu visokog opterećenja u mreži modelovan je Poasonovom raspodelom sa parametrom $\lambda_1=1,5$, dok je broj korisnika u periodu niskog opterećenja u mreži modelovan Poasonovom raspodelom sa parametrom $\lambda_2=0,5$ [Mik18a]. Ukupan broj instanci *cloud* provajdera je $M=50$. Prosečan broj korisnika *cloud* resursa je $B=250$. Pretpostavlja se da verovatnoća neraspoloživosti *cloud* instance (usled inicijacije rezervisanih, instanci na zahtev ili *spot* instanci) iznosi $Q=0,33$.

Inicijalne cene *spot block* instanci za trajanje rada *spot block* instanci bez terminiranja od 1 čas i 6 časova izabrane su na osnovu javno dostupnih podataka za *spot block* instancu *m4.10xlarge cloud* provajdera *Amazona*, za region EU (Frankfurt) uz primenu *Windows* operativnog sistema [Ama18b]. Cene *spot block* instanci za trajanje rada bez

terminiranja za 1 čas i 6 časova su $p_{0,1}=3,04$ \$/h i $p_{0,6}=3,4$ \$/h, respektivno. U skladu sa (5.4.2) i (5.4.3), $\theta=0,12$ a cene *spot block* instanci za trajanje rada bez terminiranja od 2, 3, 4 i 5 časova su: $p_{0,2}=3,112$ \$/h, $p_{0,3}=3,184$ \$/h, $p_{0,4}=3,256$ \$/h i $p_{0,5}=3,328$ \$/h, respektivno. Cena *cloud* instance na zahtev po času za ekvivalentnu *cloud* instancu je $p_o=4,24$ \$/h [Ama18b].

Imajući u vidu prethodno navedene cene, adekvatno je pretpostaviti da su vrednosti parametara koji određuju granice u izboru određene strategije pri kreiranju vrednosti ponude sledeće: $\delta_1 = \delta_6 = \delta_o = 0,2$.

Posmatraju se četiri scenarija u zavisnosti od dominantne strategije kreiranja ponuda. Scenario 1, 2 i 3 predstavljaju situaciju u kojoj korisnici *cloud* resursa u najvećem udelu biraju prvu ($q_1=0,50$; $q_2=0,30$; $q_3=0,20$), drugu ($q_1=0,30$; $q_2=0,50$; $q_3=0,20$) i treću strategiju ($q_1=0,20$; $q_2=0,30$; $q_3=0,50$), respektivno. Četvrti scenario predstavlja situaciju u kojoj se sve strategije biraju sa jednakom verovatnoćom, odnosno, $q_1=q_2=q_3=0,33$. Nakon prve runde aukcije, *spot block* cene za trajanje rada bez prekidanja od 1 časa (jedinična ponuda) javno je dostupna u slučaju primene uniformne aukcije. U slučaju primene generalizovane *second-price* aukcije, javno su dostupne informacije o najnižoj dobitnoj vrednosti jedinične ponude.

Rezultati prikazani u Tabeli 5.16 predstavljaju srednju vrednost dobitnih ponuda (izražena u \$) u svim posmatranim scenarijima za periode visokog i niskog opterećenja i obe vrste aukcija. Ove vrednosti su približno jednake, odnosno, primena ovih mehanizama aukcija ima približno isti uticaj na korisnike *cloud* resursa u pogledu različitih podsticaja pri kreiranju vrednosti ponuda. Iako korisnici plaćaju različite *spot block* cene u zavisnosti od primenjenog mehanizma aukcije, njihove vrednosti ponuda su približno jednake. To znači da primena ova dva mehanizma aukcije ima isti efekat na korisnike u pogledu podsticaja da kreiraju istinite vrednosti ponuda (kreiraju ponude koje realno oslikavaju njihovu spremnost da plate).

Tabela 5.16 Prosečne vrednosti ponuda koje obezbeđuju pravo pristupa resursima u aukcijama (izražene u \$)

| Scenario | uniformna aukcija | | generalizovana <i>second-price</i> aukcija | |
|----------|----------------------------|---------------------------|--------------------------------------------|---------------------------|
| | Period visokog opterećenja | Period niskog opterećenja | Period visokog opterećenja | Period niskog opterećenja |
| 1 | 4,090 | 3,942 | 4,090 | 3,941 |
| 2 | 4,112 | 3,978 | 4,112 | 3,977 |
| 3 | 4,131 | 4,018 | 4,131 | 4,018 |
| 4 | 4,116 | 3,990 | 4,116 | 3,989 |

Rezultati prikazani u Tabeli 5.17 predstavljaju srednju vrednost prihoda po instanci (izraženu u \$) koji *cloud* provajderi ostvaruju na tržištu *spot block* instanci. Taj prihod zavisi od *spot block* cena definisanih datim mehanizmom aukcije za tekući vremenski interval i *spot block* cena definisanih u prethodnih pet vremenskih intervala, usled mogućnosti da *spot block* instance rade bez terminiranja maksimalno 6 časova. Rezultati prikazani u Tabeli 5.17 pokazuju da primena generalizovane *second-price* aukcije obezbeđuje nešto više prihode u odnosu na primenu uniformne aukcije.

Tabela 5.17 Prosečne vrednosti prihoda *cloud* provajdera u vremenskom intervalu po instanci (izražene u \$)

| Scenario | uniformna aukcija | | generalizovana <i>second-price</i> aukcija | |
|----------|----------------------------|---------------------------|--------------------------------------------|---------------------------|
| | Period visokog opterećenja | Period niskog opterećenja | Period visokog opterećenja | Period niskog opterećenja |
| 1 | 3,142 | 3,268 | 3,197 | 3,360 |
| 2 | 3,090 | 3,235 | 3,137 | 3,318 |
| 3 | 3,039 | 3,189 | 3,083 | 3,263 |
| 4 | 3,081 | 3,226 | 3,128 | 3,305 |

Prosečne uštede (izražene u %) u odnosu na inicijaciju samo instanci na zahtev prikazane su u Tabeli 5.18. Ove vrednosti predstavljaju potencijalu uštedu koju bi korisnici *cloud* resursa imali ukoliko bi koristili samo *spot block* instance umesto instanci na zahtev. Može se uočiti da je ušteda u svim posmatranim scenarijima viša od 20%. Najveću uštedu (28,334 %) obezbeđuje scenario u kojem se najčešće bira strategija kreiranja ponuda čija vrednost je približno jednaka ceni instance na zahtev u slučaju primene uniformne aukcije u periodu visokog opterećenja u mreži.

Tabela 5.18 Prosečne uštede u poređenju sa cenama instanci na zahtev (izražene u %)

| Scenario | uniformna aukcija | | generalizovana <i>second-price</i> aukcija | |
|----------|----------------------------|---------------------------|--------------------------------------------|---------------------------|
| | Period visokog opterećenja | Period niskog opterećenja | Period visokog opterećenja | Period niskog opterećenja |
| 1 | 25,907 | 22,917 | 24,600 | 20,746 |
| 2 | 27,122 | 23,708 | 26,011 | 21,755 |
| 3 | 28,334 | 24,794 | 27,283 | 23,051 |
| 4 | 27,331 | 23,915 | 26,221 | 22,062 |

Uvođenje *spot block* instanci obezbedilo je nekoliko prednosti u odnosu na regularne *spot* instance, kako za korisnike *cloud* resursa, tako i za *cloud* provajdere. *Cloud* provajderi ostvaruju bolje iskorišćenje resursa, dok korisnici *cloud* resursa mogu inicirati te instance sa mogućnošću rada bez terminiranja do 6 časova. Takođe, *spot block* cene po času za zahtevano trajanje rada bez terminiranja su fiksne u tom periodu. To znači da definisana cena ostaje fiksna nezavisno od promena u ponudi i tražnji na tržištu *cloud* instanci. Ovo je značajno unapređenje u poređenju sa regularnim *spot* instancama, gde *cloud* provajder može terminirati instancu onog momenta kada vrednost *spot* cene premaši vrednost ponude. U opštem slučaju, *spot block* cene su više od *spot* cena, ali još uvek značajno niže od cena instanci na zahtev. Rezultati pokazuju da nezavisno od izabrane strategije za kreiranje vrednosti ponuda, više prihode, u proseku, obezbeđuje primena generalizovane *second-price* aukcije. Ipak, iz perspektive korisnika *cloud* resursa, pogodnija je primena uniformne aukcije, s obzirom na to da ostvaruje više uštede u odnosu na cene instanci na zahtev. Time se pokazuje da su *spot block* instance troškovno efikasno rešenje za povremenu upotrebu koja zahteva rad bez terminiranja u trajanju kraćem od 6 časova.

5.5. Rutiranje i alokacija spektra u elastičnim optičkim mrežama u procesu obezbeđivanja sadržaja uz mogućnost migracije na *cloud*

U ovom delu poglavlja prikazan je model koji je razvijen za potrebe istovremene optimizacije problema alokacije sadržaja i problema rutiranja puteva svetlosti u elastičnim optičkim mrežama u procesu obezbeđivanja sadržaja sa mogućnošću migracije na *cloud* [Mik18b]. Problem rutiranja i dodele spektra u okviru ovog optimizacionog problema modelovan je primenom *channel-based* pristupa, gde je kanal definisan kao skup susednih segmenata spektra. Različiti tipovi sadržaja organizovani su u grupe sadržaja i skladišteni u *data* centru provajdera SA. Kako bi se ostvario cilj da svi zahtevi za obezbeđivanje sadržaja budu opsluženi, postoji mogućnost migracije grupa sadržaja na *data* centre *cloud* provajdera. Koja grupa sadržaja će biti migrirana na koji *data* centar *cloud* provajdera u osnovi zavisi od tražnje za grupe sadržaja i njihove veličine. Pored toga, rastojanje između *data* centra *cloud* provajdera i provajdera IS od koga je iniciran zahtev za obezbeđivanje sadržaja, odnosno, dužina puteva svetlosti i spektar koji zauzima dati put takođe utiču na odluku gde alocirati koje grupe sadržaja. Model [Mik18b] alocira grupe sadržaja odgovarajućim *data* centrima *cloud* provajdera, određuje puteve svetlosti u skladu sa tražnjom i istovremeno optimizuje obim migracije na *cloud*, iskorišćenost spektra i dužinu puteva svetlosti. Višekriterijumski optimizacioni problem formulisan je kao *Mixed Integer Linear Programming* (MILP), a leksikografska metoda i metoda nepotpunog leksikografskog poretka primenjeni su za određivanje relevantnosti svakog kriterijuma u funkciji cilja. Brojni eksperimenti izvođeni su u dve realistične topologije optičkih mreža kako bi se ocenila efektivnost predloženog modela.

5.5.1. Formulacija modela

Posmatra se elastična optička mreža koja je predstavljena kao unidirekcionni graf $N=(V, E)$, gde V označava skup čvorova mreže i E predstavlja skup unidirekcionnih linkova.

Pretpostavlja se da je spektar svakog optičkog linka diskretizovan u obliku uređenog skupa segmenata talasnih dužina. Svaki čvor mreže sadrži uređaj BVT. Bez narušavanja opštosti, pretpostavlja se da BVT uređaji mogu da koriste protoke iz datog skupa i mogu da primenjuju određene tehnike modulacije M , za bilo koji protok. Svaki put svetlosti koji za određeni bitski protok primenjuje određenu tehniku modulacije $m \in M$, definisana je kao podskup susednih segmenata spektra. Broj potrebnih susednih segmenata spektra za bitski protok b može se izračunati kao $\lceil (b/ef_m + \Delta G)/W \rceil$, gde ef_m označava efikasnost modulacione tehnike, ΔG označava zahtevani zaštitni opseg između susednih puteva svetlosti i W označava širinu jednog segmenta spektra [Per16]. Domet na kojem je moguće ostvariti transparentnost za određeni put svetlosti koji primenjuje tehniku modulacije m , označena je sa tr_m . Pored toga, pretpostavlja se da se ne vrše konverzije talasnih dužina na putevima svetlosti.

U kontekstu procesa obezbeđivanja sadržaja u elastičnim optičkim mrežama uz mogućnost migracije sadržaja na *cloud*, posmatra se scenario sa vertikalno integrisanim provajderom SA. Pretpostavlja se da provajder SA obezbeđuje CDN servise i poseduje sopstveni *data* centar, koji skladišti sve originalne grupe sadržaja. *Data* centri provajdera SA i *cloud* provajdera, kao i provajderi IS mogu biti locirani u bilo kom čvoru elastične optičke mreže. Pretpostavlja se da su lokacije provajdera u posmatranoj elastičnoj optičkoj mreži određene na slučajan način. Svaka instanca u analizi predstavlja jednu moguću postavku dodele funkcija čvorovima mreže, gde svaki čvor može predstavljati najviše jednog provajdera. Provajder SA vrši migraciju na *cloud* i skladišti svoje sadržaje na *data* centre *cloud* provajdera. Provajderi IS obezbeđuju pristup krajnjim korisnicima koji iniciraju zahteve za obezbeđivanje sadržaja. Posmatra se samo proces obezbeđivanja sadržaja između provajdera i zanemaruje segment procesa koji se odnosi na opsluživanje krajnjih korisnika. Ipak, uticaj krajnjih korisnika je obuhvaćen kroz agregatnu tražnju za propusnim opsegom svakog provajdera IS za određenu grupu sadržaja.

Kako bi se prognozirala tražnja za propusnim opsegom svakog provajdera IS po svakoj grupi sadržaja, i ovde je uveden faktor popularnosti sadržaja. U ovom modelu, taj faktor je označen sa ω_c , uzima vrednosti iz skupa $(0, 1)$ i predstavlja verovatnoću pristupa

određenoj grupi sadržaja c . U zavisnosti od preferencija krajnjih korisnika i popularnosti grupa sadržaja može se prognozirati ukupna tražnja za obezbeđivanje sadržaja [Mik16b].

Tražnja za propusnim opsegom koju generiše svaki provajder IS po svakoj grupi sadržaja, označena sa b_c^s , na slučajan način se dodeljuje i važi $b_c^s = \omega_c \cdot D^s$, gde $D^s \geq 0$ je slučajan ceo broj koji je dodeljen provajderu IS s . Radi jednostavnosti, pretpostavlja se da b_c^s uzima celobrojne vrednosti u daljim izračunavanjima ukupne tražnje za propusnim opsegom. Obezbeđivanje sopstvenih resursa koji zadovoljavaju vršnu vrednost ukupne tražnje, D , nije ekonomski efikasno i resursi sistema bivaju neiskorišćeni većinu vremena [Li11]. Kapacitet provajdera SA u pogledu propusnog opsega ograničen je parametrom α koji određuje udeo u procenjenoj vršnoj vrednosti ukupne tražnje za propusnim opsegom. Termin kapacitet provajdera SA u pogledu propusnog opsega odnosi se na maksimalni propusni opseg koji provajder SA može da obezbedi u datom trenutku.

Može se uočiti da je *upstream* saobraćaj (prenos zahteva za obezbeđivanje sadržaja od provajdera IS do *data* centara) skoro zanemarljiv u poređenju sa *downstream* saobraćajem (obezbeđivanje sadržaja od *data* centara do provajdera IS). Stoga, pretpostavlja se da se *downstream* saobraćaj opslužuje preko elastične optičke mreže, dok se *upstream* saobraćaj opslužuje preko bilo koje druge mreže sa komutacijom paketa.

Takođe, pretpostavlja se da je primenjena pametna strategija migracije sadržaja na *cloud* [Li11]. Prema ovoj strategiji, migracija grupa sadržaja na *data* centre *cloud* provajdera vrši se samo jednom dnevno, u periodu niskog opterećenja. Na taj način, migracija sadržaja ne uzrokuje dodatno opterećenje sistema. Grupe sadržaja koje su skladištene na *data* centru *cloud* provajdera se menjaju u zavisnosti od prethodno definisane optimalne alokacije grupa sadržaja. To znači da *data* centar *cloud* provajdera uvek sadrži optimalno alocirane grupe sadržaja.

Što se tiče rutiranja puteva svetlosti, polazi se od nekoliko pretpostavki. Ukupna tražnja za obezbeđivanjem sadržaja je opslužena, odnosno, nema blokiranja u mreži. Kapaciteti

data centara *cloud* provajdera dovoljni su da zadovolje svaku tražnju u pogledu skladišnih kapaciteta i propusnog opsega. Suma kapaciteta svih uspostavljenih puteva svetlosti dovoljna je da opsluži ukupnu tražnju za obezbeđivanje sadržaja. Segment spektra nekog linka u mreži može biti dodeljen najviše jednom putu svetlosti. Optimalna alokacija sadržaja na *data centre cloud* provajdera predstavlja skladištenje grupa sadržaja u odgovarajuće *data centre cloud* provajdera kako bi se izbeglo potencijalno odbijanje zahteva za obezbeđivanje sadržaja. Zauzete skladišne kapacitete *data* centara *cloud* provajdera treba minimizirati zbog povećanih troškova usled migracije na *cloud*. To u velikoj meri utiče na rutiranje. Koji će put svetlosti iz skupa svih izvodljivih puteva između *data* centra *cloud* provajdera i odgovarajućeg provajdera IS biti uspostavljena, između ostalog, zavisi od dužine datih puteva. Takođe, najčešći cilj rutiranja i alokacije spektra u elastičnim optičkim mrežama je minimizacija maksimalnog broja zauzetih segmenata spektra u datoj mreži.

U cilju analize prethodno opisanog problema, formulisan je sledeći MILP model.

Definisani su sledeći indeksi:

i, j : čvorovi mreže ($i, j \in V, i \neq j$).

k : izvorni čvor puta svetlosti ($k \in H \cup Z$), odnosno, čvor iz skupa koga sačinjavaju *data* centri provajdera SA (H) ili čvor iz skupa koga sačinjavaju *data* centri *cloud* provajdera (Z).

s : odredišni čvor puta svetlosti ($s \in S$), odnosno, čvor iz skupa koga sačinjavaju provajderi IS (S).

f : segment spektra $f \in F$.

c : grupa sadržaja $c \in C$.

Definisani su sledeći ulazni parametri:

α : realan broj; parametar koji ograničava ukupnu tražnju za obezbeđivanjem sadržaja, $\alpha \in (0, 1)$.

b_c^s : ceo broj; tražnja za propusnim opsegom provajdera IS s za obezbeđivanje grupe sadržaja c , $b_c^s \geq 0$.

D : ceo broj; ukupna tražnja za propusnim opsegom u procesu obezbeđivanja sadržaja, $D \geq 0$.

l_{ij} : ceo broj; dužina linka $i - j$, $l_{ij} > 0$.

G_c : ceo broj; veličine grupe sadržaja c izražena u jedinicama kapaciteta (*capacity units, cu*), $G_c > 0$.

Definisane su sledeće promenljive:

x_{ks}^{ij} : binarna vrednost; 1 ako link $i - j$ pripada putu $k - s$; 0 u suprotnom.

y_c^{ks} : binarna vrednost; 1 ako grupa sadržaja c predstavlja deo agregatnog toka puta $k - s$; 0 u suprotnom.

ε_c^k : binarna vrednost; 1 ako postoji najmanje jedno y_c^{ks} koje je jednako 1.

b_{ks} : ceo broj; bitski protok puta $k - s$, $b_{ks} \geq 0$.

q_{ks} : ceo broj; ukupan broj segmenata spektra na putu $k - s$, $q_{ks} > 0$.

q_{ks}^{ij} : ceo broj; broj segmenata spektra koje zauzima put $k - s$ na linku $i - j$, $q_{ks}^{ij} \geq 0$.

q_{ij}^{sum} : ceo broj; ukupan broj zauzetih segmenata spektra na linku $i - j$, $q_{ij}^{sum} \geq 0$.

θ_f^{ij} : binarna vrednost; 1 ako je segment spektra f zauzet na linku $i - j$; 0 u suprotnom.

θ_f : binarna vrednost; 1 ako je segment spektra f zauzet na bilo kom linku u mreži; 0 u suprotnom.

Q : ceo broj; maksimalan broj zauzetih segmenata spektra na nekom linku u mreži, $Q \geq 0$.

CP_{cap} : realan broj; kapacitet provajdera SA u pogledu propusnog opsega.

L : ceo broj; ukupna dužina uspostavljenih puteva, $L > 0$.

G_{cloud} : ceo broj; ukupna veličina grupa sadržaja koje su migrirane na *data* centar *cloud* provajdera, izražen u *cu*, $G_{cloud} \geq 0$.

β_1 : realan broj, uzima vrednosti iz opsega $[0, 1)$; parametar relaksacije leksikografske metode za migraciju na *cloud*.

β_2 : realan broj, uzima vrednosti iz opsega $[0, 1)$; parametar relaksacije leksikografske metode za broj zauzetih segmenata spektra.

MILP formulacija problema glasi:

$$\text{Minimizirati } F_1 = G_{cloud} \quad (5.5.1.1)$$

$$\text{Minimizirati } F_2 = G_{cloud}^{opt} + Q \quad (5.5.1.2)$$

$$\text{Minimizirati } F_{final} = G_{cloud}^{opt} + Q^{opt} + L \quad (5.5.1.3)$$

uz ograničenja:

$$G_{cloud} \leq (1 + \beta_1) \cdot G_{cloud}^{opt} \quad (5.5.2)$$

$$Q \leq (1 + \beta_2) \cdot Q^{opt} \quad (5.5.3)$$

$$CP_{cap} = \alpha \cdot \max(D) \quad (5.5.4)$$

$$\sum_{k \in H} \sum_{c \in C} \sum_{s \in S} y_c^{ks} \cdot b_c^s \leq CP_{cap} \quad (5.5.5)$$

$$G_{cloud} = \sum_{c \in C} \sum_{k \in Z} \varepsilon_c^k \cdot G_c \quad (5.5.6)$$

$$\varepsilon_c^k \geq \frac{\sum_{s \in S} y_c^{ks}}{|S|} \quad \forall c \in C, \forall k \in Z \quad (5.5.7)$$

$$Q \geq q_{ij}^{sum}, \quad \forall i, j \in V, i \neq j \quad (5.5.8)$$

$$L = \sum_{i, j \in V} \sum_{k \in H \cup Z} \sum_{s \in S} x_{ks}^{ij} \cdot l_{ij}, \quad i \neq j \quad (5.5.9)$$

$$D = \sum_{c \in C} \sum_{s \in S} \sum_{k \in H \cup Z} y_c^{ks} \cdot b_c^s \quad (5.5.10)$$

$$\sum_{k \in H \cup Z} y_c^{ks} \leq 1, \quad \forall s \in S, \forall c \in C \quad (5.5.11)$$

$$\sum_{k \in H \cup Z} \sum_{j \in N} x_{ks}^{kj} \geq y_c^{ks}, \quad \forall s \in S, \forall c \in C \quad (5.5.12)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{s \in S} x_{ks}^{is} \geq y_c^{ks}, \quad \forall k \in H \cup Z, \forall c \in C \quad (5.5.13)$$

$$\sum_{c \in C} y_c^{ks} \geq x_{ks}^{ij}, \quad \forall s \in S, \forall k \in H \cup Z, \forall i, j \in V, i \neq j \quad (5.5.14)$$

$$\sum_{i \in \{H \cup Z\} \setminus k} x_{ks}^{ij} = 0, \quad \forall s \in S, \forall k \in H \cup Z, \forall j \in V \quad (5.5.15)$$

$$\sum_{j \in S \setminus s} x_{ks}^{ij} = 0, \quad \forall s \in S, \forall k \in H \cup Z, \forall i \in V \quad (5.5.16)$$

$$x_{ks}^{ij} + x_{ks}^{ji} \leq 1, \quad \forall s \in S, \forall k \in H \cup Z, \forall i, j \in V, i \neq j \quad (5.5.17)$$

$$\sum_{a \in N, a \neq b} x_{ks}^{aj} + \sum_{b \in N, b \neq a} x_{ks}^{jb} \leq 2, \quad \forall k \in H \cup Z, \forall s \in S, \forall j \in V, j \neq a, j \neq b \quad (5.5.18)$$

$$b_{ks} = \sum_{c \in C} y_c^{ks} \cdot b_c^s, \quad \forall k \in H \cup Z, \forall s \in S \quad (5.5.19)$$

$$q_{ks}^{ij} \geq q_{ks} + M \cdot (x_{ks}^{ij} - 1), \quad \forall k \in H \cup Z, \forall s \in S, \forall i, j \in V, i \neq j \quad (5.5.20)$$

$$q_{ks}^{ij} \geq 0, \quad \forall k \in H \cup Z, \forall s \in S, \forall i, j \in V, i \neq j \quad (5.5.21)$$

$$q_{ij}^{sum} \geq \sum_{k \in H \cup Z} \sum_{s \in S} q_{ks}^{ij}, \quad \forall i, j \in V, i \neq j \quad (5.5.22)$$

$$q_{ij}^{sum} = \sum_{f \in F} \theta_f^{ij}, \quad \forall i, j \in V, i \neq j \quad (5.5.23)$$

$$\sum_{i, j \in N} \theta_f^{ij} \leq |E| \cdot \theta_f, \quad \forall i, j \in V, \forall f \in F, i \neq j \quad (5.5.24)$$

Ciljevi predloženog optimizacionog modela uključuju minimizaciju sadržaja migriranih na *cloud*, minimizaciju maksimalnog broja zauzetih segmenata spektra na linku u mreži i minimizaciju dužine uspostavljenih puteva svetlosti. Može se uočiti da svaki atribut - kriterijum u datoj funkciji cilja ima različite jedinice mere. Pored toga, značaj svih kriterijuma nije isti. Na primer, dužina uspostavljenih puteva svetlosti verovatno je od manjeg značaja u poređenju sa iskorišćenjem spektra. Imajući u vidu sve prethodno rečeno, neophodno je primeniti metode višatributivnog odlučivanja (*Multiple Attribute Decision Making*, MADM), kako bi se rešio dati optimizacioni problem. S obzirom da migracija na *cloud* uvodi dodatne troškove, minimizacija obima migracije sadržaja na *cloud* predstavlja kriterijum od najvećeg značaja. U situacijama kada se jedan kriterijum smatra najznačajnijim, za primenu su pogodne leksikografska metoda i metoda nepotpunog leksikografskog poretka [Hwa81], [Luc56], [Tve72]. Osnovna ideja ovih metoda je poređenje alternativa u skladu sa značajem atributa. Glavna razlika između ovih metoda je ta da metoda nepotpunog leksikografskog poretka dozvoljava opsege nesavršene diskriminacije, koje određuje donosilac odluke. To znači da se jedna alternativa ne smatra boljom samo zato što ima neznatno bolju vrednost najznačajnijeg

atributa. Opsezi nesavršene diskriminacije dozvoljavaju izbor alternative koja ne daje optimalnu vrednost po najznačajnijem kriterijumu (migracija saobraćaja na *cloud* u slučaju ovog optimizacionog problema), ali obezbeđuje značajne uštede u pogledu iskorišćenja spektra ili dužine puteva. Parametri β_1 i β_2 definišu opsege nesavršene diskriminacije za migraciju sadržaja na *cloud* i iskorišćenje spektra u posmatranom optimizacionom problemu. Prvi korak u proceduri obe metode je poređenje svih alternativa u odnosu na najznačajniji kriterijum. U slučaju primene leksikografske metode, bira se alternativa sa najvišom vrednošću za ovaj kriterijum. Alternative sa najvišom vrednošću za dati kriterijum, odnosno alternative sa vrednošću neznatno nižom za dati kriterijum biraju se u slučaju primene metode nepotpunog leksikografskog poretka. Ako je izabrano više od jedne alternative, te alternative se dalje porede u odnosu na sledeći najznačajniji kriterijum. U drugom koraku se biraju alternative sa najvišom vrednošću (ili približno najvišoj vrednosti u slučaju primene metode nepotpunog leksikografskog poretka). Ova procedura se ponavlja sve dok ne preostane samo jedna alternativa, ili dok se ne razmotre svi kriterijumi. Ukoliko se dobije jedinstveno rešenje, ono je Pareto optimalno. U suprotnom, to je slabi Pareto optimum.

U skladu sa ovim metodama, ciljevi predloženog optimizacionog problema formulisani su u (5.5.1.1), (5.5.1.2) i (5.5.1.3). Analizirana je primena leksikografske metode i metode nepotpunog leksikografskog poretka. Pretpostavljeni redosled relativnog značaja za migraciju sadržaja na *cloud*, broj zauzetih segmenata spektra na bilo kom linku u mreži i dužinu uspostavljenih puteva svetlosti je 1, 2 i 3, respektivno. Cilj (5.5.1.1) predstavlja minimizaciju migracije sadržaja na *cloud*, što je ujedno kriterijum od najvećeg relativnog značaja. Optimalno rešenje iz (5.5.1.1) postaje ograničenje u minimizaciji broja zauzetih segmenata spektra po svakoj uspostavljenom putu svetlosti u (5.5.1.2), što predstavlja kriterijum koji je drugi po relativnom značaju. Cilj (5.5.1.3) odražava minimizaciju dužine uspostavljenih puteva svetlosti, koja je ograničena rešenjima iz (5.5.1.2). Ograničenja (5.5.2) i (5.5.3) predstavljaju relaksaciju leksikografske metode, što je osnova nepotpunog leksikografskog poretka. Težinski faktor β_1 u (5.5.2) odražava spremnost da se dozvoli određeno odstupanje od optimalnog rešenja u minimizaciji veličine sadržaja koji se migriraju na *data centre*

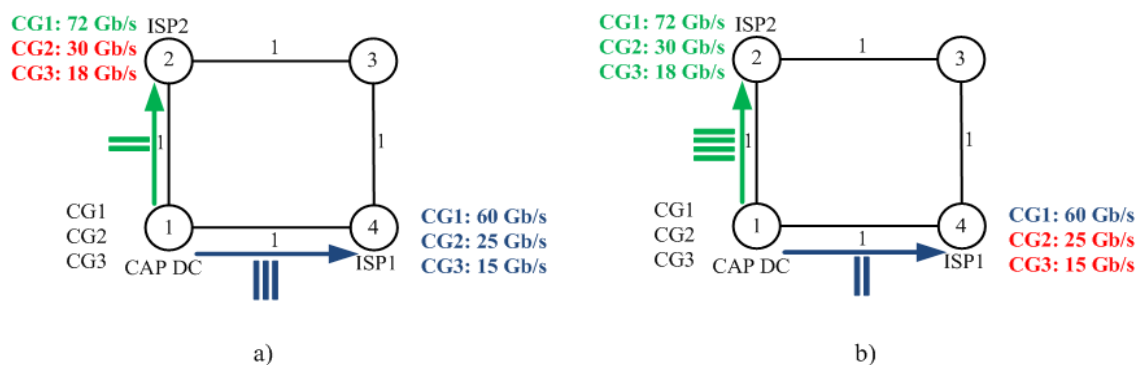
cloud provajdera. Slično tome, težinski parametar β_2 u (5.5.3) predstavlja odstupanje od optimalnog rešenja u minimizaciji broja zauzetih segmenata spektra po svakom linku. Ograničenje (5.5.4) definiše kapacitet provajdera SA u pogledu propusnog opsega. Ograničenje (5.5.5) ukazuje na to da iskorišćenje resursa provajdera SA ne može premašiti kapacitet u pogledu propusnog opsega. Veličina grupa sadržaja koje su migrirane na *data* centre *cloud* provajdera, izražena u jedinicama kapaciteta (*cu*), određena je ograničenjem (5.5.6). Promenljiva ε_c^k , koja figuriše u ograničenju (5.5.7), određuje neophodan kapacitet za migraciju grupa sadržaja na *data* centar *cloud* provajdera. Ograničenja u (5.5.8) definišu maksimalan broj zauzetih segmenata spektra na nekom linku u elastičnoj optičkoj mreži. Ograničenje (5.5.9) definiše dužinu svih uspostavljenih puteva. Ukupna tražnja za propusnim opsegom u mreži prikazana je ograničenjem (5.5.10). Ovo ograničenje takođe ukazuje na to da nema odbijenih zahteva za obezbeđivanje sadržaja u posmatranoj mreži, odnosno, sva tražnja je opslužena i odgovarajući putevi svetlosti su uspostavljeni. Ograničenja u (5.5.11) postavljaju zahtev da se svaka grupa sadržaja za koju postoji tražnja od strane nekog provajdera IS, može obezbediti samo iz jednog izvora, iz *data* centra provajdera SA, ili *data* centra *cloud* provajdera. Ograničenja u (5.5.12) uslovljavaju da, ukoliko postoji uspostavljen put svetlosti između izvornog čvora k do odredišnog čvora s , mora postojati najmanje jedan link $k-j$ koji predstavlja inicijalni link datog puta. U skladu sa (5.5.12), ograničenja u (5.5.13) uslovljavaju sledeće: ukoliko postoji uspostavljeni put svetlosti između izvornog čvora k do odredišnog čvora s , tada mora postojati najmanje jedan link $i-s$ koji predstavlja finalni link datog puta. Ograničenja u (5.5.14) zahtevaju da ukoliko postoji uspostavljeni put svetlosti između izvornog čvora k do odredišnog čvora s , tada mora postojati najmanje jedna grupa sadržaja koja se obezbeđuje korisnicima datim putem svetlosti. Ograničenja u (5.5.15) obezbeđuju da ukoliko je uspostavljeni put svetlosti između čvorova $k-s$, tada inicijalni link datog puta mora biti $k-j$, odnosno, $i = k$ u (5.5.15). U skladu sa (5.5.15), ograničenja u (5.5.16) obezbeđuju da, ukoliko postoji uspostavljeni put svetlosti $k-s$, tada finalni link datog puta mora biti $i-s$, odnosno, $j = s$ u (5.5.16). Ograničenja u (5.5.17) zabranjuju postojanje petlji u mreži, tj. linkovi $i-j$ i $j-i$ ne mogu istovremeno biti deo istog puta svetlosti. Ograničenja u (5.5.18) zahtevaju da može postojati najviše jedan ulazni link $a-j$ i najviše jedan izlazni link $j-b$ za posmatrani

posrednički čvor j puta k -s. Ova ograničenja istovremeno znače da može biti najviše dva susedna linka za posrednički čvor j koji pripada putu k -s. Zahtevani bitski protok na putu k -s definisan je u (5.5.19). Broj segmenata spektra na linku i - j koji je dodeljen putu k -s definisan je ograničenjima u (5.5.20). Ova ograničenja uslovljavaju da broj zauzetih segmenata spektra na linku i - j puta k -s mora biti jednak broju neophodnih segmenata spektra na putu k -s. Parametar M koji figuriše u ovim ograničenjima predstavlja dovoljno veliki pozitivan ceo broj, tj. primenjuje se *Big-M* metod. Broj zauzetih segmenata spektra mora biti nenegativan, kao što je definisano ograničenjima u (5.5.21). Ukupan broj zauzetih segmenata spektra na linku i - j predstavlja sumu svih zauzetih segmenata spektra po uspostavljenim putevima kojima pripada link i - j , kao što je definisano ograničenjima u (5.5.22). Ograničenja u (5.5.23) obezbeđuju da svaki segment spektra pripada tačno jednom putu na linku i - j . Ograničenja u (5.5.24) održavaju zauzetost segmenata spektra u celoj mreži.

Imajući u vidu da predloženi model predstavlja model za rutiranje i dodelu spektra koji istovremeno optimizuje veličinu grupa sadržaja migriranih na *cloud* i dužinu uspostavljenih puteva svetlosti, složenost posmatranog problema je veća u poređenju sa osnovnim problemom rutiranja i dodele spektra u elastičnim optičkim mrežama, što je NP-kompletan problem. Ipak, predloženi model je dovoljno efikasan da optimalno rešava date probleme u prihvatljivom vremenu za izvršavanje, čak i u slučajevima primene u realističnim topologijama mreža [Mik18b].

5.5.2. Ilustrativni primer rešavanja problema alokacije sadržaja i problema rutiranja i alokacije spektra

Kako bi se ilustrovao optimizacioni problem, posmatra se pojednostavljen primer prikazan na Slici 5.8 i Slici 5.9. Slika 5.8 prikazuje situaciju bez mogućnosti migracije na *cloud*. Ova mreža sastoji se iz četiri čvora, pri čemu čvor 1 predstavlja *data* centar provajdera SA (oznaka CAP DC), a čvorovi 2 i 4 predstavljaju provajdere IS 1 i 2, respektivno (oznake ISP1 i ISP2). Radi jednostavnosti, svaki link u mreži ima jediničnu dužinu. Postoje tri dostupne grupe sadržaja, označene kao: CG1, CG2 i CG3, koje su skladištene u *data* centru provajdera SA.



Slika 5.8 Ilustrativni primer problema optimizacije bez migracije na cloud

Veličina grupa sadržaja (u jedinicama kapaciteta, *cu*) i zahtevani propusni opseg svakog provajdera IS po svakoj grupi sadržaja (u Gb/s) prikazani su u Tabeli 5.19.

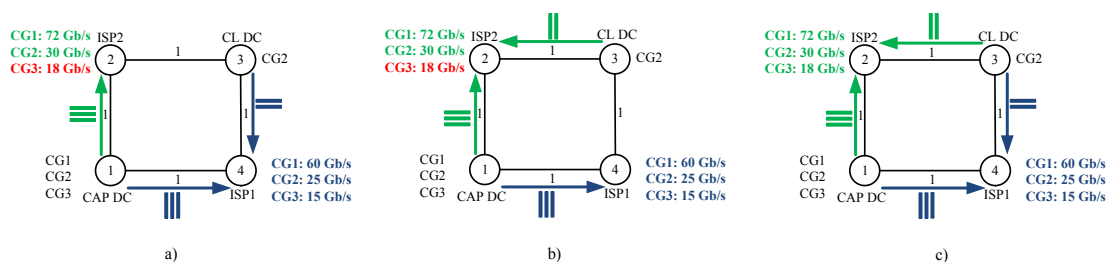
Tabela 5.19 Karakteristike i tražnja za pristupom grupama sadržaja

| | Grupa sadržaja CG1 | Grupa sadržaja CG2 | Grupa sadržaja CG3 |
|--------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Veličina grupe sadržaja (<i>cu</i>) | 20 | 10 | 15 |
| Tražnja za propusnim opsegom ISP1 | 60 | 25 | 15 |
| Tražnja za propusnim opsegom ISP2 | 72 | 30 | 18 |

Pretpostavlja se da je kapacitet provajdera SA u pogledu propusnog opsega ograničen na 180 Gb/s. S obzirom da je ukupna tražnja za propusnim opsegom provajdera ISP1 i ISP2 ukupno 220 Gb/s, neki zahtevi za obezbeđivanje sadržaja biće odbijeni. Provajder SA može izabrati opciju da opsluži tražnju provajdera ISP1 (put svetlosti 1-4 koja zauzima 3 segmenta spektra, što je označeno plavom bojom na Slici 5.8 a.), i tražnju za grupom sadržaja CG2 od strane provajdera ISP2 (put svetlosti 1-2 sa 2 segmenta spektra, što je označeno zelenom bojom na Slici 5.8 a.) To rezultuje u obezbeđivanju 172 Gb/s, dok preostalih 48 Gb/s (zahtevane grupe sadržaja CG2 i CG3 od strane provajdera ISP2, što je prikazano crvenom bojom na Slici 5.8 a.) od ukupne tražnje za propusnim opsegom biva neopsluženo. S druge strane, provajder SA može izabrati da opsluži tražnju provajdera ISP2 i tražnju provajdera IS za grupu sadržaja CG1 od strane provajdera ISP1, kao što je prikazano na Slici 5.8 b. Kapacitet provajdera SA u pogledu propusnog opsega je potpuno iskorišćen a uspostavljeni putevi svetlosti sa odgovarajućim brojem zauzetih segmenata spektra prikazani su na Slici 5.8 b odgovarajućim bojama. Preostalih 40 Gb/s (zahtevane grupe sadržaja CG2 i CG3 od

strane provajdera ISP1) biva neopsluženo, što je prikazano crvenom bojom na Slici 5.8 b. Stoga, u slučaju koji ne podrazumeva migraciju sadržaja na *cloud*, provajder SA izabraće drugi scenario, kako bi odbacivanje zahteva za obezbeđivanje sadržaja bilo minimizirano.

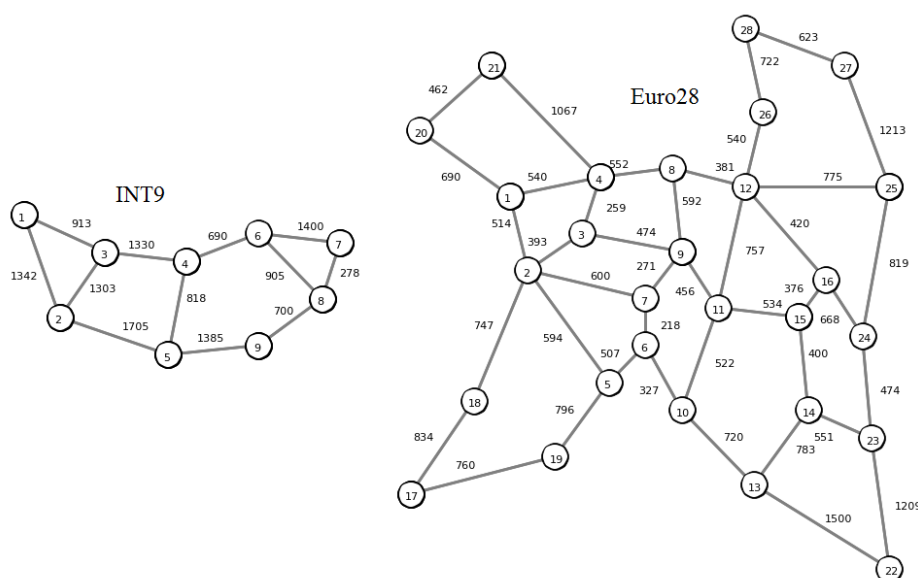
Predloženi model analizira sve moguće alternative za alokaciju grupa sadržaja i optimizuje migraciju na *cloud*, iskorišćenje spektra i dužinu uspostavljenih puteva svetlosti istovremeno. Najpre, model minimizira veličinu sadržaja koji bivaju migrirani na *data* centar *cloud* provajdera (oznaka CL DC). U datom primeru, migracija na *cloud* je minimizirana ako se migrira grupa sadržaja CG2. Postoje tri moguća scenarija: *data* centar *cloud* provajdera može obezbeđivati grupu sadržaja CG2 provajderu ISP1, provajderu ISP2, ili i ISP1 i ISP2. Model analizira sve izvodljive puteve svetlosti i teži opsluživanju ukupne tražnje (čime se obezbeđuje da sistem radi bez gubitaka). Od svih izvodljivih puteva svetlosti, model uspostavlja one koje minimiziraju maksimalan broj zauzetih segmenata spektra. Ukoliko postoji nekoliko alternativa sa istim maksimalnim brojem zauzetih segmenata spektra, model ih poredi u zavisnosti od dužine puteva. Bira se scenario koji podrazumeva da je ukupna tražnja opslužena uz minimizaciju migracije na *cloud*, minimizaciju iskorišćenja spektra i minimizaciju dužine uspostavljenih puteva. Uspostavljeni putevi svetlosti sa odgovarajućim brojem zauzetih segmenata spektra u ovom ilustrativnom primeru, prikazani su na Slici 5.9. Može se uočiti da samo scenario u kojem *data* centar *cloud* provajdera obezbeđuje grupu sadržaja CG2 provajderima ISP1 i ISP2, predstavlja rešenje bez odbijanja zahteva za obezbeđivanje sadržaja. Optimalno uspostavljeni putevi svetlosti prikazani su na Slici 5.9 c.



Slika 5.9 Ilustrativni primer problema optimizacije sa migracijom na *cloud*

5.5.3. Analiza rezultata

Primena predloženog modela testirana je na komercijalnom softverskom paketu za optimizaciju, CPLEX v12.6.1. Svi eksperimenti vršeni su na personalnom računaru Intel i5 sa 3 GHz i 8 GB RAM. U cilju analize performansi predloženog modela, vršene su simulacije na dve postojeće topologije mreža, kao što je INT9 mreža (9 čvorova i 26 unidirekcionih linkova) i Euro28 (28 čvorova i 82 unidirekciona linka) [Mik18b]. Fizičke topologije ovih mreža prikazane su na Slici 3. Dužina linkova je izražena u km i označena iznad svakog linka.



Slika 5.10 Razmatrane topologije elastičnih optičkih mreža

U svim analiziranim scenarijima, pretpostavlja se da je raspoloživ ceo C opseg od 4THz spektra, koji je diskretizovan u segmente spektra od 12.5 GHz. Takođe, prepostavlja se da BVT uređaji u čvorovima posmatrane elastične optičke mreže mogu raditi na sledećim bitskim protocima: 100 Gb/s, 200 Gb/s, 300 Gb/s ili 400 Gb/s. Pored toga, BVT uređaji mogu primenjivati tehnike fazne i kvadraturne amplitudske modulacije, i to: *Polarization Mode Binary Phase Shift Keying* (PM-BPSK), *Polarization Mode Quadrature Phase Shift Keying* (PM-QPSK), *Polarization Mode 8-State Quadrature Amplitude Modulation* (PM-8-QAM) ili *Polarization Mode 16-State Quadrature Amplitude Modulation* (PM-16-QAM), sa spektralnim efikasnostima od 2, 4, 6 ili 8

b/s/Hz, respektivno. Pretpostavlja se da je domet transparentnosti ovih tehnika modulacije 3000 km, 1500 km, 750 km i 375 km, respektivno. U zavisnosti od dometa transparentnosti, primenjuje se najefikasnija tehnika modulacije za svaki put svetlosti. Ukoliko nijedna tehnika modulacije ne može da ostvari domet transparentnosti na celom putu, primenjuje se ona modulaciona tehnika koja minimizira broj neophodnih regeneracija.

Određivanje broja neophodnih susednih segmenata spektra za svaki put svetlosti opisano je u prethodnoj sekciji ovog poglavlja. Izabrana vrednost za zahtevani zaštitni propusni opseg između susednih puteva svetlosti je 10 GHz [Per16]. Važno je naglasiti da se zauzeti susedni segmenti spektra ne mogu menjati duž puta, tj. mora biti ispunjen uslov kontinuiteta spektra. Razmatrajući broj segmenata spektra na linku i - j puta k - s u ograničenju modela (5.5.20), adekvatno je pretpostaviti da je $M = 1000$. Učesnici u procesu obezbeđivanja sadržaja locirani su u čvorovima mreže na slučajan način. Analiza je podeljena u dve faze. Najpre, analizira se uticaj različitih težinskih faktora na funkciju cilja. Zatim, ispituje se uticaj kapaciteta provajdera SA za određeni skup težinskih parametara na proizvoljnoj instanci, kako u scenariju sa manjom mrežom, tako i u scenariju sa velikom mrežom.

Pretpostavljeni scenario za svaku posmatranu topologiju mreže u pogledu broja *data* centara *cloud* provajdera, broj provajdera IS i broj dostupnih grupa sadržaja prikazani su u Tabeli 5.20. Na osnovu brojnih eksperimenata izabrani su sledeći težinski parametri za primenu leksikografske metode i metode nepotpunog leksikografskog poretka: $\beta_1 = \{0; 0,05; 0,10; 0,15; 0,20\}$ i $\beta_2 = \{0; 0,05; 0,10; 0,15; 0,20\}$ izabrani su za obe topologije mreže. Takođe, parametar α uzima vrednosti iz opsega $\alpha = \{0,4; 0,5; 0,6\}$, tj. provajder SA može da opslužuje 40%, 50% ili 60% od vršne vrednosti tražnje za propusnim opsegom, respektivno [Mik16b], [Li11].

Kada je $\beta_1 = 0$ i $\beta_2 = 0$, primenjena je leksikografska metoda, što znači da se biraju samo one alternative koje obezbeđuju optimalno rešenje po posmatranom kriterijumu. U suprotnom, primenjuje se metoda nepotpunog leksikografskog poretka. U cilju određivanja pogodnijeg rešenja u odnosu na preostale kriterijume, ova metoda razmatra alternative sa neznatnim odstupanjem od optimalnog rešenja za dati kriterijum i

uključuje ih u dalju analizu. Ovo je fleksibilnija metoda i dozvoljava definisanje granica tolerancije. Pretpostavljene vrednosti za granice tolerancije su 5%, 10%, 15% i 20% od optimalnog rešenja za posmatrani kriterijum. Na primer, minimizacija veličine sadržaja koji su migrirani na *cloud* je kriterijum od najvećeg značaja, međutim, malo odstupanje (5% - 20%) od optimalnog rešenja neće značajno narušiti ukupne performanse. Takođe, može unaprediti vrednosti rešenja po drugim kriterijumima u funkciji cilja.

Za svaki posmatrani scenario, vršene su simulacije na 100 proizvoljnih instanci. Svaka instanca definisana je različitim alokacijama učesnika u procesu obezbeđivanja sadržaja (*data* centar provajdera SA, *data* centri *cloud* provajdera i provajderi IS) po čvorovima u mreži, različitim saobraćajnim zahtevima i različitim veličinama grupa sadržaja. Alokacija učesnika po čvorovima, tražnja za propusnim opsegom i veličine grupa sadržaja određeni su na slučajnan način. Provajder SA, *cloud* provajder i provajderi IS mogu biti locirani u bilo kom čvoru mreže. Međutim, podrazumeva se da jedan čvor može biti dodeljen najviše jednom učesniku.

Tabela 5.20 Karakteristike razmatranih scenarija elastičnih optičkih mreža

| Topologija mreže | Broj <i>cloud data</i> centara | Broj provajdera Internet servisa | Broj grupa sadržaja |
|------------------|--------------------------------|----------------------------------|---------------------|
| INT9 | 1 | 4 | 5 |
| Euro28 | 2 | 8 | 5 |

Rezultati simulacija na mreži INT9 kada je $\alpha = 0,4$ sumirani su u Tabeli 5.21. Može se uočiti da migracija na *cloud*, kao najznačajniji kriterijum, u proseku varira između 12,35 jedinica kapaciteta (*cu*) i 12,70 jedinica kapaciteta (*cu*). Prosečan broj zauzetih segmenata spektra varira između 21,450 do 22,950. Konačno, prosečna dužina uspostavljenih puteva svetlosti varira između 15095,350 km i 15816,050 km. U slučaju primene leksikografske metode, $\beta_1 = 0$, postoji 6 alternativa koje obezbeđuju optimalno rešenje po kriterijumu migracije na *cloud*. Stoga, analiza se nastavlja po sledećem kriterijumu po značaju, odnosno, po broju zauzetih segmenata spektra. Postoje dve alternative koje ostvaruju minimum od 22,200 segmenata spektra. Ove alternative se dalje porede u odnosu na preostali kriterijum, tj. dužinu uspostavljenih puteva svetlosti. Međutim, ne postoji jedinstveno rešenje, tako da ove dve alternative

obezbeđuju slabi Pareto optimum. Primenom metode leksikografskog nepotpunog poretka moguće je ostvariti rešenja koja nisu najbolja, ali daju bolje rezultate u odnosu na druge kriterijume. Ovo tvrđenje pokazalo se tačnim, što se može uočiti u rezultatima sumiranim u Tabeli 5.21. Neznatno odstupanje od optimalnog rešenja prema kriterijumu veličine grupa sadržaja koje su migrirane na *data centar cloud* provajdera vodi ka značajnom poboljšanju dužina uspostavljenih puteva svetlosti, dok prosečan broj zauzetih segmenata spektra nema značajne promene. U zavisnosti od ciljeva optimizacije i spremnosti da se prihvate neka odstupanja od optimalnog rešenja po nekom od kriterijuma, mogu se izabrati različite vrednosti parametara.

Tabela 5.21 *Određivanje parametara u višeatributivnom odlučivanju za INT9, $\alpha = 0,4$*

| β_1 | β_2 | Migracija na <i>cloud</i> (<i>cu</i>) | Broj zauzetih segmenata spektra | Dužina uspostavljenih puteva svetlosti (km) | Vrednost funkcije cilja |
|-----------|-----------|--------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------|
| 0 | 0 | 12,350 | 22,200 | 15816,050 | 15850,603 |
| | 0,05 | 12,350 | 22,350 | 15651,650 | 15686,353 |
| | 0,10 | 12,350 | 22,350 | 15651,650 | 15686,353 |
| | 0,15 | 12,350 | 22,350 | 15651,650 | 15686,353 |
| | 0,20 | 12,350 | 22,950 | 15603,850 | 15639,153 |
| 0,05 | 0 | 12,350 | 22,200 | 15816,050 | 15850,603 |
| | 0,05 | 12,350 | 22,350 | 15651,650 | 15686,353 |
| | 0,10 | 12,350 | 22,350 | 15651,650 | 15686,353 |
| | 0,15 | 12,350 | 22,350 | 15651,650 | 15686,353 |
| | 0,20 | 12,350 | 22,950 | 15603,850 | 15639,153 |
| 0,10 | 0 | 12,600 | 21,550 | 15513,000 | 15547,153 |
| | 0,05 | 12,600 | 21,700 | 15348,600 | 15382,903 |
| | 0,10 | 12,600 | 21,700 | 15348,600 | 15382,903 |
| | 0,15 | 12,600 | 21,800 | 15295,700 | 15330,103 |
| | 0,20 | 12,600 | 22,550 | 15180,700 | 15215,853 |
| 0,15 | 0 | 12,600 | 21,550 | 15427,650 | 15461,803 |
| | 0,05 | 12,700 | 21,650 | 15263,250 | 15297,603 |
| | 0,10 | 12,600 | 21,700 | 15263,250 | 15297,553 |
| | 0,15 | 12,700 | 21,700 | 15210,350 | 15244,753 |
| | 0,20 | 12,700 | 22,450 | 15095,350 | 15130,503 |
| 0,20 | 0 | 12,700 | 21,450 | 15427,650 | 15461,803 |
| | 0,05 | 12,700 | 21,600 | 15263,250 | 15297,553 |
| | 0,10 | 12,700 | 21,600 | 15263,250 | 15297,553 |
| | 0,15 | 12,700 | 21,700 | 15210,350 | 15244,753 |
| | 0,20 | 12,700 | 22,450 | 15095,350 | 15130,503 |

Zbog sličnosti zaključaka, biće prikazani samo rezultati za INT9 mrežu za $\alpha = 0,4$. Uticaj vrednosti parametra α na rezultate analiziran je na jednoj proizvoljnoj instanci. Imajući u vidu rezultate prikazane u Tabeli 5.21, izabrane su sledeće vrednosti za parametre u višeatributivnom odlučivanju: $\beta_1 = 0,05$ i $\beta_2 = 0,2$ (dozvoljeno je odstupanje od 5% i 20% od optimalnog rešenja za migraciju sadržaja na *cloud*, respektivno). Ove vrednosti parametara obezbeđuju zadovoljavajuće rezultate za migraciju sadržaja na *cloud*, dok su vrednosti po drugim kriterijumima u datom optimizacionom problemu (broj zauzetih susednih segmenata spektra i dužina uspostavljenih puteva svetlosti) značajno unapređeni. U posmatranoj instanci, *data* centar provajdera SA lociran je u čvoru 1, *data* centar *cloud* provajdera lociran je u čvoru 9, provajderi IS locirani su u čvorovima: 2, 4, 5 i 8. Veličine grupa sadržaja CG1, CG2, CG3, CG4 i CG5 su sledeće: 12 *cu*, 2 *cu*, 9 *cu*, 11 *cu* i 7 *cu*, respektivno. Tražnja za propusnim opsegom za obezbeđivanje svake grupe sadržaja od strane svakog provajdera IS prikazana je u Tabeli 5.22.

Tabela 5.22 Tražnja za propusnim opsegom za proizvoljnu instancu INT9 mreže

| Provajder Internet servisa | Tražnja za propusnim opsegom pri obezbeđivanju grupa sadržaja (Gb/s) | | | | |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| | CG1 | CG2 | CG3 | CG4 | CG5 |
| ISP1 | 53 | 68 | 52 | 53 | 38 |
| ISP2 | 57 | 74 | 57 | 57 | 42 |
| ISP3 | 43 | 55 | 42 | 43 | 31 |
| ISP4 | 35 | 45 | 34 | 35 | 25 |

Rezultati simulacija za različite vrednosti parametra α za proizvoljnu instancu INT9 mreže prikazani su u Tabeli 5.23. Očekivano, s obzirom na to da provajder SA obezbeđuje više sopstvenih resursa (veće vrednosti α), potrebno je manje sadržaja migrirati na *data* centar *cloud* provajdera. Može se uočiti da veličina sadržaja migriranih na *data* centar *cloud* provajdera nema linearnu zavisnost od vrednosti parametra α . Takođe, iste dužine uspostavljenih puteva svetlosti moguće je ostvariti nezavisno od vrednosti parametra α . Razlog za to je činjenica da mreža ima samo 9 čvorova i da postoji mali broj izvodljivih puteva svetlosti koje je moguće uspostaviti. Ipak, iskorišćenje spektra se razlikuje, a zavisnost od vrednosti parametra α nije linearna. Pored toga, razlikuje se alokacija grupa sadržaja. Kako bi se postiglo najbolje moguće

rešenje, potrebno je uključiti u analizu i vrednost parametra α , ne samo parametre u višeatributivnom odlučivanju.

Tabela 5.23 Rezultati simulacija za proizvoljnu instancu INT9 mreže

| α | Grupe sadržaja migrirane na <i>data</i> centar <i>cloud</i> provajdera | Veličina grupa sadržaja na <i>data</i> centru <i>cloud</i> provajdera (<i>cu</i>) | Broj zauzetih segmenata spektra | Dužina uspostavljenih puteva svetlosti (km) |
|----------|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------|
| 0,4 | CG2, CG4, CG5 | 20 | 27 | 17864 |
| 0,5 | CG2, CG3, CG5 | 18 | 24 | 17864 |
| 0,6 | CG2, CG5 | 9 | 32 | 17864 |

Rezultati simulacija za izabrane parametre u višekriterijumskom odlučivanju za Euro28 mrežu prikazani su u Tabeli 5.24.

Tabela 5.24 Određivanje parametara za Euro28, $\alpha = 0.4$

| β_1 | β_2 | Migracija na <i>cloud</i> (<i>cu</i>) | Broj zauzetih segmenata spektra | Dužina uspostavljenih puteva svetlosti (km) | Vrednost funkcije cilja |
|-----------|-----------|-----------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------|-------------------------|
| 0 | 0 | 11,000 | 41,450 | 30527,450 | 30579,910 |
| | 0,05 | 11,000 | 41,800 | 29400,100 | 29452,909 |
| | 0,10 | 11,000 | 42,900 | 27926,500 | 27980,409 |
| | 0,15 | 11,000 | 43,350 | 27063,350 | 27117,709 |
| | 0,20 | 11,000 | 44,000 | 26081,650 | 26136,659 |
| 0,05 | 0 | 11,050 | 41,000 | 30971,900 | 31023,960 |
| | 0,05 | 11,050 | 41,400 | 29790,050 | 29842,510 |
| | 0,10 | 11,050 | 42,600 | 27787,150 | 27840,809 |
| | 0,15 | 11,050 | 43,050 | 26924,000 | 26978,109 |
| | 0,20 | 11,050 | 43,700 | 25942,300 | 25997,059 |
| 0,10 | 0 | 11,150 | 40,450 | 30874,850 | 30926,460 |
| | 0,05 | 11,150 | 40,850 | 29726,300 | 29778,309 |
| | 0,10 | 11,150 | 42,150 | 27673,200 | 27726,509 |
| | 0,15 | 11,150 | 42,800 | 26300,800 | 26354,759 |
| | 0,20 | 11,150 | 43,500 | 25320,250 | 25374,909 |
| 0,15 | 0 | 11,200 | 40,350 | 30568,250 | 30619,810 |
| | 0,05 | 11,250 | 40,700 | 29419,700 | 29471,659 |
| | 0,10 | 11,200 | 42,150 | 26755,100 | 26808,459 |
| | 0,15 | 11,200 | 42,850 | 25382,700 | 25436,759 |
| | 0,20 | 11,200 | 43,350 | 25226,900 | 25281,459 |
| 0,20 | 0 | 11,600 | 39,950 | 30159,050 | 30210,609 |
| | 0,05 | 11,600 | 40,400 | 28846,850 | 28898,859 |
| | 0,10 | 11,600 | 41,850 | 26123,950 | 26177,409 |
| | 0,15 | 11,550 | 42,700 | 24403,750 | 24458,009 |
| | 0,20 | 11,700 | 43,400 | 24184,800 | 24239,909 |

Slično rezultatima u Tabeli 5.21, primenom leksikografske metode najpre se razmatraju alternative koje obezbeđuju optimalno rešenje po najznačajnijem kriterijumu. U ovom slučaju, to je migracija na *cloud* od 11,000 *cu* (5 alternativa). Dalje se analizira sledeći kriterijum po relativnom značaju, tj. broj zauzetih susednih segmenata spektra. Može se uočiti da postoji samo jedna alternativa koja obezbeđuje optimalno rešenje od 41,450 segmenata spektra. Ova alternativa ostvaruje dužinu uspostavljenih puteva svetlosti od 30527,450 km. Stoga, dato rešenje obezbeđuje Pareto optimum. Kao i u slučaju manje mreže, primenom metode leksikografskog nepotpunog poretka moguće je unaprediti rešenja po nekim kriterijumima uz dozvoljavanje izbora neoptimalnih rešenja po drugim kriterijumima. Zbog sličnosti zaključaka, prikazani su samo rezultati za $\alpha = 0,4$.

Uticaj vrednosti parametra α na rezultate u Euro28 mreži analiziran je na proizvoljnoj instanci. U skladu sa rezultatima prikazanim u Tabeli 5.24, izabrane su sledeće vrednosti parametara: $\beta_1 = 0,05$ i $\beta_2 = 0,15$ (dozvoljeno je odstupanje od 5% i 15% od optimalnog rešenja za migraciju na *cloud* i iskorišćenje spektra, respektivno). U datoj instanci, *data* centar provajdera SA lociran je u čvoru 24, *data* centri *cloud* provajdera locirani su u čvorovima 13 i 18, provajderi IS locirani su u sledećim čvorovima: 3, 5, 9, 10, 14, 15, 18 i 28. Veličine dostupnih grupa sadržaja CG1, CG2, CG3, CG4 i CG5 su sledeće: 2 *cu*, 1 *cu*, 6 *cu*, 1 *cu* i 2 *cu*, respektivno. Tražnja za propusnim opsegom po svakoj grupi sadržaja od strane svakog provajdera IS prikazana je u Tabeli 5.25.

Tabela 5.25 Tražnja za propusnim opsegom za proizvoljnu instancu Euro28 mreže

| Provajder Internet servisa | Tražnja za propusnim opsegom pri obezbeđivanju grupa sadržaja (Gb/s) | | | | |
|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|
| | CG1 | CG2 | CG3 | CG4 | CG5 |
| ISP1 | 29 | 60 | 60 | 20 | 38 |
| ISP2 | 35 | 74 | 74 | 25 | 48 |
| ISP3 | 34 | 72 | 72 | 24 | 46 |
| ISP4 | 23 | 47 | 47 | 16 | 30 |
| ISP5 | 30 | 63 | 63 | 21 | 40 |
| ISP6 | 39 | 83 | 83 | 28 | 53 |
| ISP7 | 39 | 81 | 81 | 27 | 52 |
| ISP8 | 35 | 73 | 73 | 25 | 47 |

Rezultati simulacija za proizvoljnu instancu Euro28 mreže za $\alpha = \{0,4; 0,5; 0,6\}$ prikazani su u Tabeli 5.26. Kao i u analizi manje mreže, što su veći sopstveni kapaciteti provajdera SA, to je potrebno manje sadržaja migrirati na *data* centre *cloud* provajdera. Dužina uspostavljenih puteva svetlosti značajno varira u zavisnosti od izabrane vrednosti parametra α . Broj zauzetih segmenata spektra takođe varira, kao i veličina grupa sadržaja migriranih na *data* centre *cloud* provajdera. Stoga, u zavisnosti od ciljeva provajdera SA, treba izabrati različitu kombinaciju vrednosti parametara α , β_1 i β_2 .

Tabela 5.26 Rezultati simulacija za proizvoljnu instancu Euro28 mreže

| α | Grupe sadržaja migrirane na <i>data</i> centar <i>cloud</i> provajdera | Veličina grupa sadržaja na <i>data</i> centru <i>cloud</i> provajdera (<i>cu</i>) | Broj zauzetih segmenata spektra | Dužina uspostavljenih puteva svetlosti (km) |
|----------|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------|
| 0,4 | CG1, CG2, CG5 | 5 | 42 | 48268 |
| 0,5 | CG2, CG4, CG5 | 4 | 56 | 28846 |
| 0,6 | CG2, CG5 | 3 | 64 | 27615 |

Poređenje MILP modela za 100 instanci u scenariju sa INT9 mrežom prikazano je u Tabeli 5.27. Kapacitet provajdera sadržaja i aplikacija ograničen je na 40% od vršne vrednosti tražnje za propusnim opsegom ($\alpha = 0,4$).

Tabela 5.27 Poređenje MILP modela za INT9 mrežu, $\alpha = 0,4$

| Vrednost funkcije cilja | Migracija na <i>cloud</i> (<i>cu</i>) | Broj zauzetih segmenata spektra | Dužina uspostavljenih puteva svetlosti (km) | Prosečno vreme rada računara (sekunde) |
|-------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------|
| G_{cloud} | 12,350 | 24,800 | 16951,750 | 0,149 |
| Q | 43,400 | 14,950 | 7679,900 | 0,406 |
| L | 43,400 | 20,200 | 6214,750 | 0,048 |
| $G_{cloud} + Q + L$ | 12,350 | 22,200 | 15816,050 | 0,332 |

Prva kolona Tabele 5.27 predstavlja analizirane ciljeve u predloženom modelu. Kao što je naznačeno ranije, G_{cloud} označava veličinu sadržaja migriranih na *data* centar *cloud* provajdera, Q označava broj zauzetih susednih segmenata spektra i L označava dužinu uspostavljenih puteva svetlosti. Za potrebe poređenja modela korišćena je samo leksikografska metoda. Može se uočiti da je potrebno migrirati istu veličinu sadržaja na *data* centar *cloud* provajdera (12,350 *cu*) u slučaju primene predloženog modela i u

slučaju primene modela čiji je jedini cilj optimizacija migracije na *cloud*. Modeli koji imaju za cilj samo optimizaciju iskorišćenja spektra ili optimizaciju dužine uspostavljenih puteva svetlosti zahtevaju značajno veću migraciju na *cloud* (43,400 *cu*). U skladu sa očekivanjima, najniže iskorišćenje spektra (14,950 susednih segmenata spektra) postiže model koji ima za cilj samo optimizaciju dužina uspostavljenih puteva svetlosti. U poređenju sa modelom koji optimizuje samo migraciju na *cloud*, predloženi model jednako je efikasan u pogledu optimizacije migracije na *cloud*. Pored toga, predloženi model obezbeđuje bolje performanse u pogledu iskorišćenja spektra i dužine uspostavljenih puteva svetlosti. Analiza prosečnog vremena rada računara potrebnog za izvršavanje modela pokazuje da je predloženi model složeniji i zahteva više računarskog vremena u poređenju sa modelima sa jednom funkcijom cilja G_{cloud} i L , ali manje složen od modela koji optimizuje samo iskorišćenje spektra. Problem rutiranja i alokacije spektra je najzahtevniji u pogledu računarskog vremena potrebnog za izvršavanje. Međutim, optimizacija migracije sadržaja na *cloud* i dužine uspostavljenih puteva svetlosti mogu ograničiti prostor izvodljivih rešenja. Zato, model koji istovremeno optimizuje analizirane ciljeve je efikasniji i nalazi optimalna rešenja brže od modela koji optimizuje samo iskorišćenje spektra.

U Tabeli 5.28 prikazani su rezultati MILP modela primenjenih na Euro28 mreži. Slično scenariju sa malom mrežom, prikazani su samo rezultati za $\alpha = 0,4$. Za potrebe poređenja efikasnosti predloženog modela sa modelima sa jednom funkcijom cilja korišćena je samo leksikografska metoda.

Tabela 5.28 Poređenje MILP modela za INT9 mrežu, $\alpha = 0,4$

| Vrednost funkcije cilja | Migracija na <i>cloud</i> (<i>cu</i>) | Broj zauzetih segmenata spektra | Dužina uspostavljenih puteva svetlosti (km) | Prosečno vreme rada računara (sekunde) |
|-------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------|
| G_{cloud} | 11,000 | 43,800 | 27245,500 | 266,980 |
| Q | 79,100 | 18,150 | 13146,850 | 413,848 |
| L | 79,100 | 34,250 | 9651,650 | 0,292 |
| $G_{cloud} + Q + L$ | 11,000 | 41,450 | 30527,450 | 105,598 |

Rezultati prikazani u Tabeli 5.28 pokazuju da je predloženi model jednako efikasan kao model koji optimizuje samo migraciju na *cloud* (11,000 *cu*); unapređuje iskorišćenje

spektra, ali narušava rešenja u pogledu dužine uspostavljenih puteva svetlosti. Modeli koji optimizuju samo iskorišćenje spektra i samo dužinu uspostavljenih puteva svetlosti daju značajno lošija rešenja u pogledu migracije na *cloud* (79,100 *cu*). Analizom potrebnog vremena rada računara za izvršavanje pokazalo se da predloženi model zahteva značajno manje vremena rada računara u poređenju sa modelima koji optimizuju samo migraciju na *cloud* i samo iskorišćenje spektra. Jedini model koji zahteva kraće vreme rada računara je onaj koji optimizuje samo dužinu uspostavljenih puteva svetlosti. Slično scenariju sa malom mrežom, predloženi model je efikasniji s obzirom da analizirani kriterijumi ograničavaju polje izvodljivih rešenja čime postaje jednostavnije nalaženje optimalnog rešenja.

6. ZAKLJUČAK

Vertikalna interkonekcija predstavlja pitanje od presudnog značaja za učesnike u mrežama budućeg Interneta, kako sa tehničkog, tako i sa ekonomskog i regulatornog aspekta. Uslovi pod kojima se uspostavlja vertikalna interkonekcija između učesnika zavise od karakteristika i ciljeva samih učesnika, kao i od njihovih poslovnih relacija koje predstavljaju odraz konkurentnosti i položaja na tržištu. Imajući u vidu promene u Internet okruženju, od izuzetnog je značaja adekvatno odrediti relacije između učesnika u vertikalnoj interkonekciji. Značajne promene u Internet okruženju javile su se pojavom računarstva u oblaku, čime je omogućen pristup skalabilnim, elastičnim i deljivim fizičkim ili virtuelnim resursima uz obezbeđivanje i administriranje servisa na zahtev. Integracija *cloud* resursa i sopstvenih resursa provajdera može predstavljati obećavajuće rešenje koje ostvaruje brojne prednosti u pogledu elastične platforme za dinamičnu i jednostavnu skalabilnost, pojednostavljuje obezbeđivanje infrastrukture i omogućava unapređenje performansi. Virtuelizacija, kao jedna od najznačajnijih karakteristika računarstva u oblaku, dovela je do transformacije konvencionalnih *data* centara u fleksibilnu *cloud* infrastrukturu. Unapređenje servisa i aplikacija zahtevnih u pogledu propusnog opsega i ekspanzija računarstva u oblaku dovode do konstantnog rasta Internet saobraćaja. Poslednjih godina, Internet saobraćaj u najvećoj meri je generisan od strane ograničenog broja velikih učesnika: vodećih provajdera sadržaja i aplikacija i vodećih *cloud* provajdera. Sve stroži zahtevi u pogledu propusnog opsega nameću potrebu za razvojem i implementacijom tehnologija koje će moći da podrže te zahteve. Elastične optičke mreže, čija je osnovna prednost veća granularnost u alokaciji propusnog opsega, predstavljaju obećavajuće rešenje za transportni nivo mreže koja može podržati troškovno efikasno obezbeđivanje servisa, sadržaja i aplikacija.

Predmet istraživanja ove doktorske disertacije su tehničko-ekonomski aspekti vertikalne interkonekcije, optimizacija relacija i optimizacija iskorišćenosti kapaciteta između učesnika u mrežama budućeg Interneta. U okviru disertacije predloženi su modeli koji

imaju za cilj određivanje adekvatnog ugovora o interkonekciji između učesnika u vertikalnoj interkonekciji, određivanje adekvatnog mehanizma tarifiranja i alokacije resursa *cloud* provajdera u procesu obezbeđivanja sadržaja od strane provajdera sadržaja i aplikacija i optimizacija alokacije sadržaja na *data* centre provajdera sadržaja i aplikacija i *cloud* provajdera uz istovremenu optimizaciju problema rutiranja i alokacije spektra u elastičnim optičkim mrežama.

Najpre je, za potrebe određivanja odgovarajućeg ugovora o interkonekciji u procesu obezbeđivanja sadržaja uz mogućnost migracije sadržaja na *cloud*, izvršeno modelovanje zahteva za obezbeđivanje sadržaja koje uzima u obzir neizvesnost u tražnji za pristupom sadržajima. Analiza je obuhvatila određivanje tražnje za propusnim opsegom, iskorišćenje resursa vertikalno integrisanog provajdera sadržaja i aplikacija, stopu odbijenih zahteva za obezbeđivanje sadržaja, troškove za uspostavljanje parcijalne migracije sadržaja na *cloud* i ostvarene profite provajdera sadržaja i aplikacija i provajdera Internet servisa u slučaju primene različitih ugovora o interkonekciji. Rezultati ukazuju na to da je parcijalna migracija sadržaja na *cloud* troškovno-efikasno rešenje koje smanjuje stopu odbijenih zahteva za obezbeđivanje sadržaja. Pokazalo se da *Revenue Sharing* ugovor o interkonekciji, u odgovarajućim scenarijima, može predstavljati adekvatan ugovor o interkonekciji koji će obezbediti zadovoljavajuće profite i provajdera sadržaja i aplikacija, i provajdera Internet servisa.

Proširenje analize procesa obezbeđivanja sadržaja uz mogućnost migracije sadržaja na *cloud*, izvršeno je u domenu troškova provajdera sadržaja i aplikacija u slučaju izbora različitih tarifnih mehanizama *cloud* provajdera. Predložen je nov, hibridni model pristupa resursima *cloud* provajdera. Relevantan parametar za poređenje modela pristupa resursima *cloud* provajdera bio je stopa odbijenih zahteva za obezbeđivanje sadržaja. Rezultati su pokazali da predloženi hibridni model predstavlja kompromisno rešenje u kontekstu minimizacije troškova i minimizacije stope odbijenih zahteva za pristup sadržajima.

Pristup neiskorišćenim resursima *cloud* provajdera kroz dinamičke mehanizme alokacije i tarifiranja obezbeđuje brojne prednosti kako *cloud* provajderima u obliku minimizacije troškova, tako i korisnicima *cloud* resursa u obliku snižavanja cena. Predmet analize

bile su mogućnosti primene i poređenje različitih mehanizama aukcija. Predloženi su modeli za izbor odgovarajuće strategije pri kreiranju ponuda u procesu aukcija. Takođe je predložen novi model za određivanje cena neiskorišćenih resursa *cloud* provajdera. Analizirane su ponude, prihodi *cloud* provajdera i moguće uštede korisnika u predloženom modelu. Rezultati su pokazali da mehanizmi aukcija, uz izbor adekvatne strategije pri kreiranju ponuda, mogu biti efikasno rešenje za povećanje iskorišćenosti resursa *cloud* provajdera i minimizaciju troškova korisnika *cloud* servisa.

U cilju pronalaženja rešenja za rastuće zahteve u pogledu propusnog opsega u procesu obezbeđivanja sadržaja uz mogućnost migracije sadržaja na *cloud*, predložen je model koji vrši optimalnu alokaciju grupa sadržaja na *data* centre *cloud* provajdera, uspostavlja puteve svetlosti u skladu sa saobraćajnim zahtevima i istovremeno optimizuje obim migracije sadržaja na *cloud*, iskorišćenje spektra u posmatranoj elastičnoj optičkoj mreži i dužinu uspostavljenih puteva svetlosti. Za evaluaciju performansi predloženog modela, vršene su simulacije na dve realistične topologije optičkih mreža. Pokazalo se da predloženi model implementira prednosti primenjenog algoritma rutiranja i migracije na *cloud*. Model se može primeniti u različitim scenarijima mreža nezavisno od tražnje za obezbeđivanjem sadržaja i nezavisno od lokacije *data* centara *cloud* provajdera.

Najznačajniji naučni doprinosi u okviru ove doktorske disertacije su sledeći:

- predložen je i analiziran model za izbor odgovarajućeg ugovora o interkonekciji u slučaju uspostavljanja vertikalne interkonekcije između vertikalno integrisanog provajdera sadržaja i aplikacija i provajdera Internet servisa u procesu obezbeđivanja sadržaja krajnjim korisnicima, uz mogućnost migracije sadržaja na *cloud*,
- predložen je i ispitivan nov model za izbor odgovarajućeg mehanizma tarifiranja za pristup resursima *cloud* provajdera od strane provajdera sadržaja i aplikacija,
- razvijen je i analiziran model za definisanje cena neiskorišćenih resursa *cloud* provajdera koji se obezbeđuju primenom aukcija,
- razvijen i evaluiran je model za rešavanje problema optimizacije alokacije sadržaja na *data* centre provajdera sadržaja i aplikacija i *cloud* provajdera uz

istovremenu optimizaciju problema rutiranja i alokacije spektra u elastičnim optičkim mrežama.

Mogućnosti za dalja unapređenja u oblasti vertikalne interkonekcije između učesnika u budućem Internetu su višestruke. Detaljnija analiza mera performansi i uključivanje kvaliteta servisa može doprineti unapređenju modela za određivanje adekvatnog ugovora o interkonekciji između učesnika u procesu obezbeđivanja servisa, sadržaja i aplikacija. Imajući u vidu karakteristike računarstva u oblaku i prednosti dinamičkih modela za alokaciju i tarifiranje pristupa *cloud* resursima, kao i pojavu novih načina obezbeđivanja *cloud* resursa, istraživanje se može proširiti u cilju pronalaženja novih, unapređenih modela za pristup. Predmet budućih istraživanja može biti i optimizacija troškova migracije na *cloud* kroz nove modele alokacije sadržaja i njihov uticaj na rešavanje problema rutiranja i alokacije spektra u procesu obezbeđivanja sadržaja preko elastičnih optičkih mreža.

LITERATURA

- [Abh12] V. Abhishek, I. A. Kash, P. Key, “Fixed and Market Pricing for Cloud Services”, in *Proceedings of IEEE INFOCOM Workshops*, Orlando, 2012, pp. 157–162.
- [Abk17] F S. Abkenar, A. G. Rahbar, “Study and Analysis of Routing and Spectrum Allocation (RSA) and Routing, Modulation and Spectrum Allocation (RMSA) Algorithms in Elastic Optical Networks (EONs)”, *Optical Switching and Networking*, 23(1), pp. 5–39, 2017.
- [Aib14a] M. Aibin, K. Walkowiak, “Dynamic Routing of Anycast and Unicast Traffic in Elastic Optical Networks with Various Modulation Formats - Trade-Off between Blocking Probability and Network Cost”, in *Proceedings of IEEE 15th International Conference on High Performance Switching and Routing (HPSR)*, Vancouver, 2014, pp. 64–69.
- [Aib14b] M. Aibin, K. Walkowiak, “Simulated Annealing Algorithm for Optimization of Elastic Optical Networks with Unicast and Anycast Traffic”, in *Proceedings of 2014 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, Graz, 2014, pp. 1–4.
- [Ala16] R. W. Alaskar, I. Ahmad, A. Alyatama, “Offline Routing and Spectrum Allocation Algorithms for Elastic Optical Networks”, *Optical Switching and Networking*, 21, pp. 79–92, 2016.
- [Alb13] A. M. Alberti, “A Conceptual-Driven Survey on Future Internet Requirements, Technologies, and Challenges”, *Journal of the Brazilian Computer Society*, 19(3), pp. 291–311, 2013.
- [Ama15] Amazon EC2 Pricing, 2015. [Online]. Available: <https://aws.amazon.com/ec2/pricing/>
- [Ama17] Amazon EC2 Pricing, 2017. [Online]. Available: <https://aws.amazon.com/ec2/pricing/reserved-instances/pricing/>
- [Ama18a] Amazon EC2 Spot instances, 2018. [Online]. Available: <https://aws.amazon.com/blogs/aws/new-ec2-spot-blocks-for-defined-duration-workloads/>
- [Ama18b] Amazon EC2 Spot pricing, 2018. [Online]. Available: <https://aws.amazon.com/ec2/spot/pricing/>

- [Ans14] J. Anselmi, D. Ardagna, J. C. S. Lui, A. Wierman, Y. Xu, Z. Yang, “The Economics of the Cloud: Price Competition and Congestion”, *ACM SIGecom Exchanges*, 13(1), pp. 58-63, 2014.
- [App13] D. Appelegate, A. Archer, V. Gopalakrishnan, S. Lee, K. K. Ramakrishnan, “Content Placement via the Exponential Potential Function Method”, in M. Goemans, J. Correa (eds.), *Integer Programming and Combinatorial Optimization*, Springer, Berlin, 2013. pp. 49-61.
- [App16] D. Appelegate, A. Archer, V. Gopalakrishnan, S. Lee, K. K. Ramakrishnan, “Optimal Content Placement for a Large-Scale Vod System”, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 24(4), pp. 2114–2127, 2016.
- [Art14] Arthur D. Little Global, *The Future of the Internet - Innovation and Investment in IP Interconnection*, Liberty Global, 2014.
- [Avr09] Z. Avramova, S. Witevrongel, H. Bruneel, D. De Vleeschauwer, “Analysis and Modeling of Video Popularity Evolution in Various Online Video Content Systems: Power-Law versus Exponential Decay”, in *Proceedings of 2009 First International Conference on Evolving Internet*, Cannes, 2009, pp. 95–100.
- [Bar15] G. Baranwal, D. P. Vidyarthi, “A Fair Multi-Attribute Combinatorial Double Auction Model for Resource Allocation in Cloud Computing”, *The Journal of Systems and Software*, 108, pp. 60-76, 2015.
- [Bar18] G. Baranwal, D. Kumar, Z. Raza, D. P. Vidyarthi, *Auction Based Resource Provisioning in Cloud Computing*, Springer Nature Singapore, Singapore, 2018.
- [Bas15] S. Basu, S. Chakraborty, M. Sharma, “Pricing Cloud Services - the Impact of Broadband Quality”, *Omega*, 50, pp. 96-114, 2015.
- [Ber12] BEREC Report. BoR (12) 130, 2012.
- [Bes13] S. M. Besen, M. A. Israel, “The Evolution of Internet Interconnection from Hierarchy to “Mesh”: Implications for Government Regulation”, *Information Economics and Policy*, 25(4), pp. 235–245, 2013.
- [Bil10] V. Bilò, A. Fanelli, M. Flammini, G. Melideo, L. Moscardelli, “Designing Fast Converging Cost Sharing Methods for Multicast Transmissions”, *Theory of Computing Systems*, 47(2), pp. 507-530, 2010.
- [Bla83] R. D. Blair, D. L. Kaserman, *Law and Economics of Vertical Integration and Control*, Academic Press, INC, New York, 1983.
- [Ble08] Y. Bleischwitz, F. Schoppmann, “Group-strategy Proof Cost Sharing for Metric Fault Tolerant Facility Location”, in *Proceedings of International Symposium on Algorithmic Game Theory*, Beijing, 2018, pp. 350–361.

- [Cac03] G. P. Cachon, “Supply Chain Coordination with Contracts”, *Hanbooks in Operations Research and Management Science*, 11, pp. 227–339, 2003.
- [Cap15] M. Caporuscio, C. Ghezzi, “Engineering Future Internet Applications: The Prime Approach”, *The Journal of Systems and Software*, 106, pp. 9–27, 2015.
- [Cha07] M. Cha, H. Kwak, P. Rodriguez, Y. -Y. Ahn, S. Moon, “I Tube, You Tube, Everybody Tubes: Analyzing the World's Largest User Generated Content Video System”, in *Proceedings of 7th ACM SIGCOMM Conference on Internet Measurements*, New York, 2007, pp. 1–14.
- [Che18] F. Chen, H. Li, J. C. Liu, B. Li, K. Xu, Y. Hu, “Migrating Big Video Data to Cloud: A Peer-Assisted Approach for VoD”, *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 11(5), pp. 1060-1074, 2018.
- [Che18] J. Cheng, R. Jian, J. Shen, “Elastic Optical Networks for Future Internet and New Defragment Scheme by Extending the Maximal Unoccupied Spectrum Blocks”, in *Proc. IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electroni and Automation Control Conference (IAEAC 2018)*, Chongqing, China, 2018.
- [Chi14] S. Chichin, Q. B. Vo, R. Kowalczyk, “Truthful Market-Based Trading of Cloud Services with Reservation Price”, in *Proceedings of the IEEE International Conference on Services Computing (SCC 2014)*, Anchorage, 2014, pp. 27–34.
- [Cho11] Y. Choi, A. Silvester, H. Kim, “Analyzing and Modelling Workload Characteristics in a Multiservice IP Network”, *IEEE Internet Computing*, 15(2), pp. 35-42, 2011.
- [Chr11] K. Christodouloupoulos, I. Tomkos, E. Varvarigos “Elastic Bandwidth Allocation in Flexible OFDM Based Optical Networks”, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 29(9), pp. 1354–1366, 2011.
- [Cis16] Cisco Global Cloud Index: Forecast and Methodology, 2016-2021. [Online]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/global-cloud-index-gci/white-paper-c11-738085.html>
- [Cis19] Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017-2019. [Online]. Available: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-741490.html>
- [Cli13] M. Klinkowski, K. Walkowiak, “On the Advantages of Elastic Optical Networks for Provisioning of Cloud Computing Traffic”, *IEEE Network*, 27(6), pp. 44-51, 2013.

- [Coh14] J. Cohen, L. Echabbi, “Pricing Composite Cloud Services: The Cooperative Perspective”, in *Proceedings 2014 Fifth International Conference on Next Generation Networks and Services*, Casablanca, 2014, pp. 335-342.
- [Cor11] L. M. Correia, H. Abramowicz, M. Johnsson, K. Wunstel (eds.), *Architecture and Design for the Future Internet - 4WARD Project*, Springer, Netherlands, 2011.
- [Cos16] L. R. Costa, G. N. Ramos, A. C. Drummond, “Leveraging Adaptive Modulation with Multi-Hop Routing in Elastic Optical Networks”, *Computer Networks*, 105, pp. 124–137, 2016.
- [Cou14] P. Coucheney, P. Maille, and B. Tuffin, “Network Neutrality Debate and ISP Inter-relations: Traffic Exchange, Revenue Sharing, and Disconnection Threat”, *Economics Research and Electronic Networking*, 15(3), pp. 155-182, 2014.
- [Deb99] R. Deb, L. Razzolini, “Voluntary Cost Sharing for an Excludable Public Project”, *Mathematical Social Sciences*, 37(2), pp. 123–138, 1999.
- [Dev12] C. Develder, B. Dhoedt, M. Pickavet, D. Colle, F. de Turck, P. Demeester, “Optical Networks for Grid and Cloud Computing Applications”, in *Proceedings of the IEEE*, 100(5), pp. 1149–1167, 2012.
- [Dir02] Directive 2002/19/EC of the European Parliament and of the Council of 7 March 2002 on access to, and interconnection of, electronic communications networks and associated facilities (Access Directive), 2002.
- [Dir09] Directive 2009/140/EC of the European Parliament and of the Council of 25 November 2009 amending Directives 2002/21/EC on a common regulatory framework for electronic communications networks and services, 2002/19/EC on access to, and interconnection of, electronic communications networks and associated facilities, and interconnection of, electronic communication networks and associated facilities, and 2002/20/EC on the authorisation of electronic communications networks and services, 2009.
- [Dob17] S. Dobzinski, S. Ovadia, “Combinatorial Cost Sharing”, in *Proceedings of the 2017 ACM Conference on Economics and Computation*, Cambridge 2017, pp. 387-404.
- [Fan18] X. Fang, “Analysis of Double Marginalization Effect on the Wholesale Price Contract Coordination”, *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 35(2), pp. 1840005-1–1840005-15, 2018.

- [Fer15] S. Ferdousi, F. Dikbiyik, “Disaster-Aware Datacenter Placement and Dynamic Content Management in Cloud Networks”, *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 7(7), pp. 681–394, 2015.
- [Ge19] F. Ge, L. Tan, Y. Chang, W. Zhang, M. Liu, “Performance of Flexi-Grid Networks with Dynamic and Contiguous Resource Allocation”, *Optical Fiber Technology*, 50, pp. 62–70, 2019.
- [Ger12] O. Gerstel, M. Jinno, A. Lord, S. J. B. Yoo, “Elastic Optical Networking: A New Dawn for the Optical Layer?”, *IEEE Communications Magazine*, 50(2), pp. s12-s20, 2012.
- [Gos14a] R. Goscien, K. Walkowiak, M. Klinkowski, “Distance-Adaptive Transmission in Cloud-Ready Elastic Optical Networks”, *Journal of Optical Communications Networking*, 6(10), pp. 816-828, 2014.
- [Gos14b] R. Goscien, K. Walkowiak, M. Klinkowski, “Joint Anycast and Unicast Routing and Spectrum Allocation with Dedicated Path Protection in Elastic Optical Networks”, in *Proceedings of the 10th International Conference on Design of Reliable Communication Networks (DRCN2014)*, Ghent, 2014, pp. 1–8.
- [Gos15] R. Goscien, K. Walkowiak, M. Klinkowski, “Tabu Search Algorithm for Routing, Modulation and Spectrum Allocation in Elastic Optical Network with Anycast and Unicast Traffic”, *Computer Networks*, 79, pp. 148–165, 2015.
- [Gos19] R. Goscien, “Two Metaheuristics for Routing and Spectrum Allocation in Cloud-Ready Survivable Elastic Optical Networks”, *Swarm and Evolutionary Computation*, 44, pp. 388-403, 2019.
- [Guo08] L. Guo, E. Tan, S. Chen, Z. Xiao, X. Zhang, “The Stretched Exponential Distribution of Internet Media Access Patterns”, in *Proceedings of 27th ACM Symposium on Principles of Distributed Computing*, New York, 2008, pp. 283–294.
- [Gya12] L. Gyarmati, M. Sirivianos, N. Laoutaris, “Sharing the Cost of Backbone Networks: Simplicity vs. Precision”, in *Proceedings of IEEE INFOCOM Workshops*, Orlando, 2012, pp. 171–176.
- [Hab12] M. F. Habib, M. Tornatore, M. De Leenher, F. Dikbiyik, B. Mukherjee, “Design of Disaster-Resilient Optical Datacenter Networks”, *IEEE Journal of Lightwave Technology*, 30(16), pp. 2563–2573, 2012.
- [Hai10] Y. Haihong, L. Nan, “Incentive Mechanism in Service Supply Chains Based on Wholesale Price Contract”, in *Proceedings of 2010 International Conference on E-Product E-Service and E-Entertainment*, Henan, 2010, pp. 1–4.

- [Hai11] Y. Haihong, L. Nan, Z. Pengjun, “Coordination mechanism in Service Supply Chains with Wholesale Price Contracts”, in *Proceedings of 2011 8th International Conference on Service Systems and Service Management*, Henan, 2011, pp. 1–6.
- [Ham14] A. Hammadi, L. Mhamdi, “A Survey on Architectures and Energy Efficiency in Data Center Networks”, *Computer Communications*, 40, pp. 1–21, 2014.
- [Har15] E. Harstead, R. Sharpe, “Forecasting of Access Network Bandwidth Demands for Aggregated Subscribers Using Monte Carlo Methods”, *IEEE Communications Magazine*, 53(3), pp. 199-207, 2015.
- [Has15a] M. M.Hassan, M. A. Al-Wadud, G. Fortino, “A Socially Optimal Resource and Revenue Sharing Mechanism in Cloud Federations”, in *Proceedings of 2015 IEEE 19th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD)*, Calabria, 2015. pp. 620-625.
- [Has15b] K. Hashimoto, H. Saitoh, “Strategy-proof Cost Sharing under Increasing Returns: Improvement of the Supremal Welfare Loss”, *Games and Economic Behavior*, 89(2015), pp. 101–121, 2015.
- [He06] L. He, J. Walrand, “Pricing and Revenue Sharing Strategies for Internet Service Providers”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 24, no. 5, pp. 942–951, 2006.
- [He12] J. He, X. Zhao, B. Zhao, “A Fast, Simple and Near-Optimal Content Placement Scheme for a Large-Scale Vod System”, in *Proceedings of IEEE International Conference on Communication Systems (ICCS)*, Singapore, 2012, pp. 387–382.
- [Hoe13] M. Hoefler, “Strategic Cooperation in Cost Sharing Games”, *International Journal of Game Theory*, 42(1), pp. 29-53, 2013.
- [Hu13] H. Xu, B. Li, “Dynamic Cloud Pricing for Revenue Maximization”, *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 1(2), pp. 158-171, 2013.
- [Hu18] B. Hu, C. Meng, D. Xu, Y.-J. Son, “Supply Chain Coordination under Vendor Managed Inventory-Consignment Stocking Contracts with Wholesale Price Constraint and Fairness”, *International Journal of Production Economics*, 202, pp. 21-31, 2018.
- [Hwa81] C L. Hwang, K. Yoon, *Multiple Attribute Decision Making - Methods and Applications, A state-of-the-art Survey*, Springer-Verlag, New York, 1981.
- [Irg05] Principles of Implementation and Best Practice regarding the use and implementation of Retail Minus pricing as applied to electronic communication activities, IRG(05)39, 2005.

- [ITU04a] ITU-T Recommendation Y.2001, “General Overview of NGN”, 2004.
- [ITU04b] ITU-D Study Group 1, Question 6-1/1, “Report on Interconecion”, 3rd study period (2002-2006), 2014.
- [ITU11a] ITU Document WG-WSIS-18/05, “The Future Internet - Report to the Dedicated Group on International Internet-related Public Policy”, 2011.
- [ITU11b] ITU-T Recommendation Y.3001, “Future Networks: Objectives and Design Goals”, 2011.
- [ITU12] ITU-T Recommendation G.694.1, “Spectral Grids for WDM Applications: DWDM Frequency Grid”, 2012.
- [ITU14] ITU-T Recommendation Y.3500, “Information technology – Cloud computing –Overview and vocabulary”, 2014.
- [ITU17] ITU-D Study Group 1, Final Report, Question 3/1, “Access to Coud Computing: Challenges and Opportunities for Developing Countries”, 6th study period (2014-2017), 2017.
- [ITU19] ITU-T Recommendations Y series 2019. [Online]. Available: <https://www.itu.int/itu-t/recommendations/index.aspx?ser=Y>
- [Jam13] P. Jamashidi, A. Ahmad, C. Pahl, “Cloud Migration Research: A Systematic Review”, *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 1(2), pp. 142-157, 2013.
- [Jap13] P. Jappinen, R. Guarneri, L. M. Correia, “An Applications Perspective into the Future Internet”, *Journal of Network and Computer Applications*, 36(1), pp. 249–254, 2013.
- [Jav13] B. Javadi, R. K. Thulasiram, R. Buyya, “Characterizing Spot Price Dynamics in Public Cloud Environments”, *Future Generation Computer Systems*, 29(4), pp. 988-999, 2013.
- [Jia15] Y. Jiang, X. Ma, W. Chen, “Cost-Effective Resource Configuration for Cloud Video Streaming Services”, in *Proceedings of the 21th IEEE International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPADS)*, Melbourne, 2015, pp. 430-439.
- [Jin09] M. Jinno, H. Takara, B. Kozicki, Y. Tsukishima, Y. Sone, S. Matsuoka, “Spectrum-Efficient and Scalable Elastic Optical Path Network: Architecture, Benefits, and Enabling Technologies”, *IEEE Communications Magazine*, 47(11), pp. 66-73, 2009.
- [Jun11] D. Jung, S. Chin, K. Chung, H. Yu, J. Gil, “An Efficient Checkpointing Scheme Using Price History of Spot Instances in Cloud Computing Environment”, in E. Altman, W. Shi (eds.), *Network and Parallel Computing*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. pp. 185-200.

- [Kam15] B. Kaminski, P. Szufel, “On Optimization of Simulation Execution on Amazon EC2 Spot Market”, *Simulation Modelling and Theory*, 58(2), pp. 172-187, 2014.
- [Kar15] S. Karunakaran, R. Sundarraj, “Bidding Strategies for Spot Instances in Cloud Computing Markets”, *IEEE Internet Computing*, 19(3), pp. 32-40, 2015.
- [Kha19] A. N. Khan, “Online Service Provisioning in Elastic Optical Networks with Hybrid Algorithm for Congestion Aware Routing and Spectrum Allocation”, *Optical Fiber Technology*, 47, pp. 27–32, 2019.
- [Kli11] M. Klinkowski, K. Walkowiak, “Routing and Spectrum Assignment in Spectrum Sliced Elastic Optical Path Network”, *IEEE Communications Letters*, 15(8), pp. 884–886, 2011.
- [Kli13] M. Klinkowski, “An Evolutionary Algorithm Approach for Dedicated Path Protection Problem in Elastic Optical Networks”, *Cybernetics and Systems - Intelligent Network Security and Survivability*, 44(6-7), pp. 589-605, 2013.
- [Kos18] A. Kostić-Ljubisavljević, B. Mikavica, “Vertical Integration between Providers with Possible Cloud Migration”, in M. Khosrow-Pour (ed.), *Encyclopedia of Information Science and Technology*, IGI Global, Berlin, Heidelberg, 2018. pp. 1164-1173.
- [Kum17] D. Kumar, G. Baranwal, Z. Raza, D. P Vidyarthi, “A Systematic Study of Double Auction Mechanisms in Cloud Computing”, *Journal of Systems and Software*, 125, pp. 234-255, 2017.
- [Lee13] H. Lee, H. Jang, Y. Yi and J. Cho, “On the Interaction between Content-oriented Traffic Scheduling and Revenue Sharing among Providers”, in *Proceedings 2013 IEEE INFOCOM*, Turin, 2013, pp. 3201-3206.
- [Les13] L. M. Leslie, Y. C. Lee, P. Lu, A. Y. Zomaya, “Exploiting Performance and Cost Diversity in the Cloud”, in *Proceedings of the IEEE Sixth International Conference on Cloud Computing*, Santa Clara, 2014, pp. 107–114.
- [Li11] H. Li, J. Liu, B. Li, K. Xu, “Cost-effective Partial Migration of VoD Services to Content Clouds”, in *Proceedings of 2011 IEEE 4th International Conference on Cloud Computing*, Washington, 2011, pp. 203–210.
- [Lin10] W. -Y. Lin, G. -Y. Lin, H. -Y. Wei, “Dynamic Auction Mechanism for Cloud Resource Allocation”, in *Proceedings of the 10th IEEE/ACM International Conference on Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGrid)*, Melbourne, 2010, pp. 591–592.
- [Lin15] W. Lingyun, L. Jiafei, “Coordination Strategy in a SaaS Supply Chain with Network Effect and SLA”, in *Proceedings 2015 12th International*

Conference on Service Systems and Service Management (ICSSSM), Guangzhou, 2015, pp. 1-6.

- [Lor16] A. Lord, Y. R. Zhou, R. Jensen, A. Morea, M. Ruiz, “Evolution from Wavelength-Switched to Flex-Grid Optical Networks”, in V. Lopez, L. Velasco (eds.), *Elastic optical networks: Architecture, technologies and control*, Springer International Publishing, Switzerland, 2016. pp. 7-30.
- [Lu17] F. Lu, J. Zhang, W. Tang, “Wholesale Price Contract versus Consignment Contract in a Supply Chain Considering Dynamic Advertising”, *International Transactions in Operational Research*, 00(2017), pp. 1–27, 2017.
- [Lu18] L. Lu, J. Yu, Y. Zhu, M. Li, “A Double Auction Mechanisms to Bridge Users' Task Requirements and Providers' Resources in Two-Sided Cloud Markets”, *IEEE Transaction on Parallel and Distributed Systems*, 29(4), pp. 720-730, 2018.
- [Luc56] R. D. Luce, “Semiorde and a Theory of Utility Discrimination”, *Econometrica*, 24(2), pp. 178–191, 1956.
- [Mai14] P. Maille, B. Tuffin, *Telecommunication Network Economics - From Theory to Application*, Cambridge University Press, 2014.
- [Mar11] D. Martin, L. Volker, M. Zitterbart, “A Flexible Framework for Future Internet Design, Assessment, and Operation”, *Computer Networks*, 55(4), pp. 910–918, 2011.
- [Mar17] G. Markovic, “Routing and Spectrum Allocation in Elastic Optical Networks Using Bee Colony Optimization”, *Photonic Network Communications*, 34(3), pp. 356-374, 2017.
- [Mat14] F. Matera, “Dynamic Optical Networks for Future Internet Environments”, *Fiber and Integrated Optics*, 33(3), pp. 251–265, 2014.
- [Mee12] H. de Meer, K. A. Hummel, R. Basmadjian, “Future Internet Services and Architectures: Trends and Visions”, *Telecommunication Systems*, 51(4), pp. 219–303, 2012.
- [Meh07] A. Mehta, T. Roughgarden, M. Sundararajan, “Beyond Moulin Mechanisms”, in *Proceedings of the 8th ACM Conference on Electronic Commerce*, San Diego, 2007, pp. 1–10.
- [Mik15a] B. Mikavica, A. Kostić-Ljubisavljević, V. Radonjić Đogatović, “Content and Service Provider Interconnection Charging based on Revenue-Sharing Concept”, in *Proceedings of L International Scientific Conference on Information, Communication and Energy Systems and Technologies (ICEST)*, Sofia, 2015, pp. 195–198.

- [Mik15b] B. Mikavica, A. Kostić-Ljubisavljević, V. Radonjić Đogatović, “Revenue-Sharing Agreement for Content and Service Providers Interconnection”, in *Proceedings of 2nd International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering (IcETRAN)*, Srebrno Jezero, 2015, pp. TEI2.3.1–TEI2.3.5.
- [Mik15c] B. Mikavica, A. Kostić-Ljubisavljević, “Primena Revenue-Sharing koncepta za tarifiranje interkonekcije provajdera sadržaja i provajdera servisa”, *Zbornik radova XXXIII Simpozijuma o novim tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju – POSTEL 2015*, Beograd, 2015, str. 325-334.
- [Mik16a] B. Mikavica, V. Radonjić Đogatović, A. Kostić-Ljubisavljević, “Mogućnosti primene spot pricing mehanizma u cloud okruženju”, *Zbornik radova XXXIV Simpozijuma o novim tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju – POSTEL 2016*, Beograd, 2016, str. 305-314.
- [Mik16b] B. Mikavica, A. Kostic-Ljubisavljevic, “Interconnection Contracts between Service and Content Provider with Partial Cloud Migration”, *Elektronika Iri Elektrotehnika*, 22(6), pp. 92-98, 2016.
- [Mik17a] B. Mikavica, A. Kostic-Ljubisavljevic, V. Radonjić Đogatović, “Mogućnosti primene aukcija za tarifiranje i alokaciju resursa cloud provajdera”, *Tehnika*, 6, pp. 879-885, 2017.
- [Mik17b] B. Mikavica, A. Kostic-Ljubisavljevic, V. Radonjic Djogatovic, “Cost Analysis of Provider's Partial Cloud Migration”, in *Proceedings 2017 13th International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications (TELSIKS)*, Nis, 2017, pp. 279-282.
- [Mik17c] B. Mikavica, A. Kostic-Ljubisavljevic, V. Radonjic Djogatovic, “Auction-Based Pricing Mechanisms for Cloud Spot Instances”, in *Proceedings of the XLIV Symposium on Operational Research - SYM-OP-IS*, Zlatibor, 2017, pp. 740-745.
- [Mik18a] B. Mikavica, A. Kostic-Ljubisavljevic, “Pricing and Bidding Strategies for Cloud Spot Block Instances”, in *Proceedings of the 41st International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO)*, Opatija, 2018, pp. 419-424.
- [Mik18b] B. Mikavica, G. Markovic, A. Kostic-Ljubisavljevic, “Lightpath Routing And Spectrum Allocation Over Elastic Optical Networks In Content Provisioning With Cloud Migration”, *Photonic Network Communications*, 36(2), pp. 187-200, 2018.
- [Miy19] Y. Miyagawa, Y. Watanabe, M. Shigeno, K. Ishii, A. Takefusa, A. Yoshise, “Bounds for Two Static Optimization Problems on Routing and Spectrum

- Allocation of Anycasting”, *Optical Switching and Networking*, 31, pp. 144–161, 2019.
- [Mou99] H. Moulin, “Incremental Cost Sharing: Characterization by Coalition Strategy-Proofness”, *Social Choice and Welfare*, 16(2), pp. 279–320, 1999.
- [Net15] Netflix Internet Connection Speed Recommendations, 2018 [Online]. Available: <https://help.netflix.com/en/node/306>
- [Nie16] J. A. Niederhoff, P. Kouvelis, “Generous, Spiteful, or Profit Maximizing Suppliers in the Wholesale Price Contract: A Behavioral Study”, *European Journal of Operational Research*, 253(2), pp. 372-382, 2016.
- [Nis11] The NIST Definition of Cloud Computing - Recommendations of the National Institute of Standards and Technology, 2011.
- [Pal12] M. Pallot, B. Trousse, B. Senach, “A Tentative Design of a Future Internet Networking Domain Landscape”, in F. Alvarez, F. Cleary, P. Daras, J. Dominique, A. Galis, A. Garcia, A. Gavras, S. Karnourkos, S. Krco, M.-S. Li, V. Lotz, H. Muller, E. Salvadori, A.-M. Sassen, H. Schaffers, B. Stiller, G. Tselentis, P. Turkama, T. Zahariadis (eds.), *The Future Internet - The Future Internet Assembly 2012: From Promises to Reality*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2012. pp. 237-249.
- [Pan11] J. Pan, S. Paul, R. Jain, “A Survey of the Research on Future Internet Architectures”, *IEEE Communications Magazine*, 49(7), pp. 26–36, 2011.
- [Pap12] D. Papadimitriou, T. Zahariadis, P. Martinez-Julia, I. Papafili, V. Morreale, F. Torelli, B. Sales, P. Demeester, “Design Principles for the Future Internet Architecture”, in F. Alvarez, F. Cleary, P. Daras, J. Dominique, A. Galis, A. Garcia, A. Gavras, S. Karnourkos, S. Krco, M.-S. Li, V. Lotz, H. Muller, E. Salvadori, A.-M. Sassen, H. Schaffers, B. Stiller, G. Tselentis, P. Turkama, T. Zahariadis (eds.), *The Future Internet - The Future Internet Assembly 2012: From Promises to Reality*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2012. pp. 55-67.
- [Par14] J. Park, N. Im, J. Mo, “ISP and CP collaboration with Content Piracy”, in *Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Communication Systems*, Macau, 2011, pp. 172–176.
- [Per16] J. Perello, K. Walkowiak, M. Klinkowski, S. Spadaro, D. Careglio, “Joint Content Placement and Lightpath Routing and Spectrum Assignment in CDNs over Elastic Optical Network Scenarios”, *Computer Communications*, 77, pp. 72–84, 2016.
- [Rou09] T. Roughgarden, M. Sundararajan, “Quantifying Inefficiency in Cost-Sharing Mechanisms”, *Journal of the ACM*, 54(4), pp. 23:1-23:33, 2009.

- [Sal15] M. A. Salahuddin, H. Elbiaze, W. Ajib, R. Glitho, “Social Network Analysis Inspired Content Placement with QoS in Cloud-Based Content Delivery Networks”, in *Proceedings 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, San Diego, 2015, pp. 1–6.
- [Sch14] D. Schwerdel, B. Reuther, T. Zinner, P. Muller, P. Tran-Gia, “Future Internet Research and Experimentation: The G-Lab Approach”, *Computer Networks*, 61, pp. 102–117, 2014.
- [Sha17] P. Sharma, D. Irwin, P. Shenov, “Keep It Simple: Bidding for Servers in Today's Cloud Platforms”, *IEEE Internet Computing*, 21(3), pp. 88-92, 2017.
- [She18] F. Sheikholeslami, N. J. Navimipour, “Auction- Based Resource Allocation Mechanisms in the Cloud Environment: A Review of the Literature and Reflection on Future Challenges”, *Concurrency and Computation Practice and Experience*, 30(16), pp. 1-15, 2018.
- [Shi16] W. Shi, L. Zhang, C. Wu, Z. Li, F. C. M. Lau, “An Online Auction Framework for Dynamic Resource Provisioning in Cloud Computing”, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 24(4), pp. 2060-2073, 2016.
- [Son10] J. -D. Song, “Various Wholesale Price Equilibria for Mobile Virtual Network Operators”, *Telecommunications Policy*, 34(10), pp. 633–648, 2010.
- [Tai11] M. Taifi, J. Y. Shi, A. Kheishah, “SpotMPI: A Framework for Auction-Based HPC Computing Using Amazon Spot Instances”, in *Proceedings of the 11th International Conference on Algorithms and Architectures for Parallel Processing (ICA3PP 2011)*, Melbourne, 2011, pp. 109–120.
- [Tal14] S. Talebi, F. Alam, I. Katib, M. Khamis, R. Salama, G. N. Rouskas, “Spectrum Management Techniques for Elastic Optical Networks: A Survey”, *Optical Switching and Networking*, 13, pp. 34–48, 2014.
- [Tan07] W. Tang, Y. Fu, L. Cherkasova, A. Vahdat, “Modeling and Generating Realistic Streaming Media Server Workloads”, *Computer Networks*, 51(1), pp. 336-356, 2007.
- [Tar16] A. Taran, D. N. Lavrov, “Future Internet Architecture: Clean-Slate vs Evolutionary Design”, *Mathematical Structures and Modeling*, 39(3), pp. 142–151, 2016.
- [Too16] A. N. Toosi, F. Khodadadi, R. Buyya, “An Auction Mechanism for Cloud Spot Markets”, *ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems*, 11(1), pp. 25–57, 2016.

- [Tro10] T. Tronco (ed.), *New Network Architectures - The Path to the Future Internet*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [Tse09] G. Tselentis, J. Dominique, A. Galis, D. Hausheer, S. Krco, V. Lotz, T. Zahariadis (eds.), *Towards the Future Internet - A European Research Perspective*, IOS Press BV, Amsterdam, Netherlands, 2009.
- [Tve72] A. Tversky, "Choice by elimination", *Journal of Mathematical Psychology*, 9(4), pp. 341–367, 1972.
- [Val13] V. Di Valerio, V. Cardellini, F. Lo Presti, "Optimal Pricing and Service Provisioning Strategies in Cloud Systems: A Stackelberg Game Approach", in *Proceedings of IEEE Sixth International Conference on Cloud Computing*, Santa Clara, 2013, pp. 115–122.
- [Vel12] L. Velasco, M. Klinkowski, M. Ruiz, J. Comellas, "Modeling the Routing and Spectrum Allocation Problem for Flexgrid Optical Networks", *Photonic Network Communications*, 24(3), pp. 177-186, 2012.
- [Vel16] L. Velasco, M. Ruiz, K. Christodoulopoulos, M. Varvarigos, M. Zotkiewicz, M. Pioro, "Routing and Spectrum Allocation", in V. Lopez, L. Velasco (eds.), *Elastic optical networks: Architecture, technologies and control*, Springer International Publishing AG, Switzerland, 2016. pp. 55-81.
- [Ven12] W. Venters, E. A. Whitley, "A Critical Review of Cloud Computing: Research Desires and Realities", *Journal of Information Technology*, 27(3), pp. 179–197, 2012.
- [Wal14] K. Walkowiak, A. Kasprzak, M. Klinkowski, "Dynamic Routing of Anycast and Unicast Traffic in Elastic Optical Networks", in *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Sydney, 2014, pp. 3313-3318.
- [Wal14] K. Walkowiak, M. Klinkowski, B. Rabiega, R. Goscien, "Routing and Spectrum Allocation Algorithms for Elastic Optical Networks with Dedicated Path Protection", *Optical Switching and Networking*, 13(1), pp. 63–75, 2014.
- [Wan11] Y. Wang, X. Cao, Y. Pan, "A Study of the Routing and Spectrum Allocation in Spectrum-Sliced Elastic Optical Path Networks", in *Proceedings of IEEE INFOCOM 2011*, Shanghai, 2011, pp. 1503–1511.
- [Wan13] X. Wang, X. Wang, Y. Su, "Wholesale-Price Contract of Supply Chain with Information Gathering", *Applied Mathematical Modelling*, 37(6), pp. 3848-3860, 2013.

- [Wan14] X. Wang, K. Kuang, S. Wang, S. Xu, H. Liu, G. N. Liu, “Distance-Adaptive Transmission in Cloud-Ready Elastic Optical Networks”, *Journal of Optical Communications Networking*, 6(12), pp. 1115-1127, 2014.
- [Wan15] M. Wang, P. P. Jayaraman, R. Ranjan, K. Mitra, M. Zhang, E. Li, S. Khan, M. Pathan, D. Georgeakopoulos, “An Overview of Cloud based Content Delivery Networks: Research Dimensions and state-of-the-art”, in A. Hameurlain, J. Kung, R. Wagner, S. Sakr, L. Wang, A. Zomaya (eds.), *Transactions on Large-Scale Data-and Knowledge-Centered Systems XX*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2015. pp. 131-158.
- [Wan16] J. Wan, R. Zhang, X. Gui, B. Xu, “Reactive Pricing: An Adaptive Pricing Policy for Cloud Providers to Maximize Profit”, *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 13(4), pp. 941-953, 2016.
- [Wan16] L. Wang, G. Hu, “Smart Pricing for Cloud Resource and Service Markets: A Brief Overview”, in *Proceedings of 12th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA)*, Kathmandu, 2016, pp. 135–142.
- [Wei15] L. Wei, X. Yang, “Revenue Sharing Contract in a Cloud Computing Service Supply Chain with a Monopoly AIP and Multiple Competing ASPs under Asymmetric Information”, in *Proceedings 2015 12th International Conference on Service Systems and Service Management*, Guangzhou, 2015, pp. 1-6.
- [Wie15] J. Wienman, “Cloud Pricing and Markets”, *IEEE Cloud Computing*, 2(1), pp. 10-13, 2015.
- [Wie18] J. Wienman, “The Economics of Pay-per-Use Pricing”, *IEEE Cloud Computing*, 5(5), pp. 99-107, 2018.
- [Win15] J. Winter, R. Ono (eds.), *The Future Internet - Alternative Visions*, Springer International Publishing, Switzerland, 2015.
- [Wu11] Y. Wu, H. Kim, P. H. Hande, M. Chiang, D. H. K. Tsang, “Revenue Sharing Among ISPs in Two-sided Markets”, in *Proceedings of 2011 IEEE INFOCOM*, Shanghai, 2011, pp. 596–600.
- [Xu16] Z. Xu, C. Stewart, N. Deng, X. Wang, “Blending On-demand and Spot Instances to Lower Costs for In-memory Storage”, in *Proceedings of IEEE INFOCOM 2016 - The 35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications*, San Francisco, 2016, pp. 1–9.
- [Yoo10] Y. S. Yoon, J. Yoo, M. Choi, “Revenue Sharing is the Optimal Contractual Form for Emerging App Economy”, in *Proceedings of 2010 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, Jeju, 2010, pp. 329–334.

- [Zam13] S. Zaman, D. Grosu, “Combinatorial Auction-Based Allocation of Virtual Instances in Clouds”, *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 73(4), pp. 495-508, 2013.
- [Zan14] B. E. Zant, I. Amigo, M. Gagnaire, “Federation and Revenue Sharing in Cloud Computing Environment”, in *Proceedings 2014 IEEE International Conference on Cloud Engineering*, Boston, 2014, pp. 11-14.
- [Zha10] Q. Zhang, L. Cheng, R. Boutaba, “Cloud Computing: state-of-the-art and Research Challenges”, *Journal of Internet Services and Applications*, 1(1), pp. 7–18, 2010.
- [Zha11] Q. Zhang, E. Gurses, R. Boutaba, “Dynamic Resource Allocation for Spot Markets in Clouds”, in *Proceedings of 4th IEEE International Conference on Utility and Cloud Computing (UCC)*, Victoria, 2011, pp. 178–185.
- [Zha13] G. Zhang, M. De Leenheer, A. Morea, B. Mukherjee, “A Survey on OFDM-Based Elastic Core Optical Networking”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 15(1), pp. 65–87, 2013.
- [Zha14] Y. Zhao, T. -M. Choi, T. C. E. Cheng, S. Wang, “Mean-Risk Analysis of Wholesale Price Contracts with Stochastic Price-Dependent Demand”, *Annals Operations Research*, 257(1-2), pp. 491-518, 2014.
- [Zie13] S. Ziegler, C. Crettaz, L. Ladid, S. Krco, B. Pokric, A. F. Skarmeta, A. Jara, W. Kastner, M. Jung, “IoT6 – Moving to IPv6-based Future IoT”, in A. Galis, A. Gavras (eds.), *The Future Internet - The Future Internet Assembly 2013: Validated Results and New Horizons*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. pp. 55-67.
- [Zip32] J. K. Zipf, *Selective Studies and the Principle of Relative Frequency in Language*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1932.

BIOGRAFIJA AUTORA

Branka Mikavica, mast. inž. saobraćaja, rođena je 21.09.1988. u Priboju, gde je završila Osnovnu školu „Vuk Karadžić“ kao nosilac Vukove diplome. Gimnaziju "Pivo Karamatijević" u Novoj Varoši završila je 2007. godine, kao nosilac Vukove diplome i učenik generacije. Saobraćajni fakultet, smer Telekomunikacioni saobraćaj i mreže, upisala je 2007. godine, a diplomirala 2011. godine, sa prosečnom ocenom 9,94, kao student generacije. Master akademske studije na Saobraćajnom fakultetu upisala je školske 2011/2012. godine, a završila 2013. godine sa prosečnom ocenom 10. Doktorske akademske studije upisala je školske 2013/2014. godine na Saobraćajnom fakultetu Univeziteta u Beogradu.

Od marta 2013. godine angažovana je na Saobraćajnom fakultetu, na Katedri za telekomunikacioni saobraćaj i mreže, u realizaciji časova vežbi na osnovnim akademskim studijama iz sledećih predmeta: "Računarske mreže", "Telekomunikacioni sistemi", "Telekomunikacioni softver", "Osnovi telekomunikacionih sistema", "Osnovi telekomunikacione tehnike", "Regulativa u elektronskim komunikacijama" i "Eksploatacija komunikacionih sistema". Na master akademskim studijama angažovana je na sledećim predmetima: "Reinženjering poslovnih procesa u e-komunikacijama", "Optičke mreže" i "Telekomunikacioni sistemi u saobraćaju".

Kao autor i koautor objavila je 38 naučnih radova, od kojih: tri poglavlja u tematskom zborniku, dva rada objavljena u međunarodnim časopisima sa *SCI* liste, jedan rad u vodećem časopisu nacionalnog značaja, četiri rada u časopisima nacionalnog značaja, dvadeset radova saopštenih na skupovima međunarodnog značaja i osam radova saopštenih na skupovima nacionalnog značaja. Posедуje aktivno znanje engleskog jezika i osnovno znanje ruskog i španskog jezika.

IZJAVA O AUTORSTVU

Ime i prezime autora: Branka Mikavica
Broj indeksa: DS13D007

Izjavljujem

da je doktorska disertacija pod naslovom

MODELI VERTIKALNE INTERKONEKCIJE U MREŽAMA BUDUĆEG INTERNETA

- rezultat sopstvenog istraživačkog rada;
- da disertacija u celini ni u delovima nije bila predložena za sticanje druge diplome prema studijskim programima drugih visokoškolskih ustanova;
- da su rezultati korektno navedeni i
- da nisam kršio/la autorska prava i koristio/la intelektualnu svojinu drugih lica.

Potpis autora

U Beogradu, _____

IZJAVA O ISTOVETNOSTI ŠTAMPANE I ELEKTRONSKE VERZIJE DOKTORSKOG RADA

| | |
|----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ime i prezime autora | Branka Mikavica |
| Broj indeksa | DS13D007 |
| Studijski program | Saobraćaj |
| Naslov rada | MODELI VERTIKALNE INTERKONEKCIJE U MREŽAMA BUDUĆEG INTERNETA |
| Mentor | Dr Aleksandra Kostić-Ljubisavljević, vanredni profesor Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet |

Izjavljujem da je štampana verzija mog doktorskog rada istovetna elektronskoj verziji koju sam predao/la radi pohranjenja u **Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu**.

Dozvoljavam da se objave moji lični podaci vezani za dobijanje akademskog naziva doktora nauka, kao što su ime i prezime, godina i mesto rođenja i datum odbrane rada.

Ovi lični podaci mogu se objaviti na mrežnim stranicama digitalne biblioteke, u elektronskom katalogu i u publikacijama Univerziteta u Beogradu.

Potpis autora

U Beogradu, _____

IZJAVA O KORIŠĆENJU

Ovlašćujem Univerzitetsku biblioteku „Svetozar Marković“ da u Digitalni repozitorijum Univerziteta u Beogradu unese moju doktorsku disertaciju pod naslovom:

MODELI VERTIKALNE INTERKONEKCIJE U MREŽAMA BUDUĆEG INTERNETA

koja je moje autorsko delo.

Disertaciju sa svim priložima predao/la sam u elektronskom formatu pogodnom za trajno arhiviranje.

Moju doktorsku disertaciju pohranjenu u Digitalnom repozitorijumu Univerziteta u Beogradu i dostupnu u otvorenom pristupu mogu da koriste svi koji poštuju odredbe sadržane u odabranom tipu licence Kreativne zajednice (Creative Commons) za koju sam se odlučila.

1. Autorstvo (CC BY)
2. Autorstvo – nekomercijalno (CC BY-NC)
3. Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada (CC BY-NC-ND)
4. Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima (CC BY-NC-SA)
5. Autorstvo – bez prerada (CC BY-ND)
6. Autorstvo – deliti pod istim uslovima (CC BY-SA)

(Molimo da zaokružite samo jednu od šest ponuđenih licenci.

Kratak opis licenci je sastavni deo ove izjave).

Potpis autora

U Beogradu, _____

1. **Autorstvo.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence, čak i u komercijalne svrhe. Ovo je najslobodnija od svih licenci.
2. **Autorstvo – nekomercijalno.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
3. **Autorstvo – nekomercijalno – bez prerada.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela. U odnosu na sve ostale licence, ovom licencom se ograničava najveći obim prava korišćenja dela.
4. **Autorstvo – nekomercijalno – deliti pod istim uslovima.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca ne dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada.
5. **Autorstvo – bez prerada.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, bez promena, preoblikovanja ili upotrebe dela u svom delu, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela.
6. **Autorstvo – deliti pod istim uslovima.** Dozvoljavate umnožavanje, distribuciju i javno saopštavanje dela, i prerade, ako se navede ime autora na način određen od strane autora ili davaoca licence i ako se prerada distribuira pod istom ili sličnom licencom. Ova licenca dozvoljava komercijalnu upotrebu dela i prerada. Slična je softverskim licencama, odnosno licencama otvorenog koda.