

UNIVERZITET U BEOGRADU  
SAOBRAĆAJNI FAKULTET

Slobodan D. Mitrović

**Novi model za utvrđivanje strategija  
za proširenje mrežnih kapaciteta**

Doktorska disertacija

Beograd, 2018

UNIVERSITY OF BELGRADE  
THE FACULTY OF TRANSPORT AND TRAFFIC  
ENGINEERING

Slobodan D. Mitrović

**A NEW MODEL FOR DEVELOPING  
CAPACITY EXPANSION STRATEGIES**

Doctorial dissertation

Belgrade, 2018

**MENTOR:**

dr Valentina Radojičić, dipl.inž. - redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet

**ČLANOVI KOMISIJE:**

Dr Miodrag Bakmaz, dipl.inž. - redovni profesor  
Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet

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

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

Dr Slavko Gajin, dipl.inž. - docent  
Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet

**Datum odbrane:**

## NOVI MODEL ZA UTVRĐIVANJE STRATEGIJA ZA PROŠIRENJE MREŽNIH KAPACITETA

**Rezime:** Nove širokopojasne tehnologije i stalno rastući obim saobraćaja imaju veliki uticaj na upravljanje infrastrukturnim kapacitetima telekomunikacione mreže. Efikasno planiranje mrežnih resursa nije moguće realizovati bez primene pouzdanih modela za prognoziranje tražnje, kao i precizno odabranih veličina za karakterizaciju saobraćaja. U tom smislu, osnovni predmet istraživanja ove doktorske disertacije su strategije proširenja mrežnih resursa, koje se oslanjaju na primenu različitih metoda planiranja telekomunikacionih mreža, sa ciljem određivanja optimalnog vremena za realizaciju proširenja. Predloženi modeli proširenja resursa mreže baziraju se na optimizaciji perioda proširenja resursa mreže uz minimizaciju troškova zagušenja i troškova neophodne opreme, pri čemu se ulazni podaci oslanjaju na prognozirane vrednosti tražnje na telekomunikacionom tržištu. Mogućnosti primene različitih metoda planiranja, u kontekstu strategije proširenja mrežnih resursa, razmatrane su na hipotetičkoj WDM mreži, sa koegzistencijom fiksnih i fleksibilnih grid tehnologija. U disertaciji su razmatrani suprotstavljeni zahtevi investicionih ulaganja u cilju brzog povraćaja uloženi sredstava i kvaliteta opsluživanja korisnika. Kompromisno rešenje predstavlja i novi pristup, predložen u disertaciji, koji se odnosi na izbor parametara za karakterizaciju mrežnog saobraćaja, sa ciljem smanjenja uticaja neizvesnosti prognoziranih podataka na odluku o proširenju kapaciteta. U tom smislu, izvršena je analiza, na osnovu koje je utvrđeno da se, poređenjem vrednosti nivoa penala funkcije troškova zagušenja, sa jedne strane i vrednosti parametra Verovatnoće blokiranja kapaciteta, sa druge, može odrediti optimalni vremenski period za sprovođenje odluke o migraciji tehnologija, u posmatranom slučaju. Među najvažnijim naučnim doprinosima disertacije, mogu se izdvojiti implementacija prognoziranih vrednosti saobraćajnih zahteva, zasnovana na primeni teorije difuzionih modela, novi optimizacioni model, kao modifikacija modela strategije serijskog proširenja kapaciteta mrežnog linka, u kojem se uvodi mogućnost prelaska na novu tehnologiju, kao i novi pristup za smanjenje uticaja neizvesnosti prognoziranih podataka na određenu odluku o proširenju kapaciteta, zasnovan na izboru parametara za karakterizaciju mrežnog saobraćaja.

Ključne reči: proširenje kapaciteta; nadgradnja tehnologija; prognoziranje zahteva; optimizacija; troškovi zagušenja

Naučna oblast: Saobraćaj

Uža naučna oblast: Eksploatacija telekomunikacionog saobraćaja i mreža

UDK broj: 621.39(043.3)

## **A NEW MODEL FOR DEVELOPING CAPACITY EXPANSION STRATEGIES**

**Abstract** New broadband services and ever-increasing Internet traffic volumes have a major influence on the backbone infrastructure capacity management, raising the importance of efficient planning of network resources, based on demand forecast and the appropriate selection of traffic characterization parameters, as well. Therefore, the main subject of the research, presented in the doctoral thesis are the network resources expansion strategies, with respect of different telecommunication network planning methods. Relying on the forecasted demand in the telecommunications market, the proposed models are used in order to determine the optimal times for network capacity expansion and the technology migration, by minimizing the equipment and congestion costs. Application of different planning methods, in the context of the network resource expansion strategies, has been considered within the hypothetical WDM network, with the coexistence of fixed and flexible grid technologies. Having in mind the contrast between network performance improvement and the investors' interest for the longer operation of already built-in technologies, a novel approach has been proposed in order to determine the appropriate time for making the technology migration. In this sense, the traffic characterization parameters (the Penalty function and the Bandwidth Blocking Ratio) were used. The main innovative aspect of the approach proposed in the thesis considers the combination of these two metrics in order to decrease uncertainty of the forecasted demands. The other important scientific contributions of the dissertation are the traffic demand forecasting approach based on the diffusion model theory, as well as the novel multiperiod network capacity expansion model, which introduces the option of the migration to the new technology.

**Keywords:** capacity expansion; technology upgrade; demand forecasting; optimisation; congestion costs;

**Scientific field:** Transport and Traffic Engineering

**Field of Academic Expertise:** Operation of Telecommunication Traffic and Networks  
**UDK:** 621.39(043.3)

*Mojoj porodici*

## SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	1
PREGLED SLIKA .....	5
PREGLED TABELA .....	8
PREGLED SKRAĆENICA.....	9
1 UVODNA RAZMATRANJA .....	13
Motivacija.....	13
Istraživački ciljevi .....	14
Struktura disertacije.....	15
Polazne hipoteze.....	16
2 METODOLOGIJA PLANIRANJA MREŽE .....	18
2.1 Klasifikacija planskih aktivnosti na osnovu vremenskog aspekta.....	25
2.1.1 Dugoročno planiranje .....	27
2.1.2 Srednjoročno planiranje.....	29
2.1.3 Kratkoročno planiranje.....	33
2.2 „Breakdown“ pristup za rešavanje problema na nivou srednjoročnog i dugoročnog planiranja .....	34
2.2.1 „Breakdown“ pristup za nivo rešavanja zadataka na dugoročnom nivou.....	34
2.2.2 „Breakdown“ pristup za nivo rešavanja zadataka na srednjoročnom nivou.....	34
2.3 Problem usklađivanja kratkoročnih, srednjoročnih i dugoročnih planova .....	38
2.3.1 Uzroci neusklađenosti u planiranju .....	39
2.3.2 Mere za suzbijanje efekta neusklađenosti .....	41
2.4 Klasifikacija planskih aktivnosti prema slojevima mreže .....	43
3 PROGNOZIRANJE TRAŽNJE ZA TELEKOMUNIKACIONIM SERVISIMA ...	46
3.1 Uloga prognoziranja u procesu planiranja .....	48
3.2 Karakteristike procesa difuzije servisa od interesa za strateško planiranje mreže.....	52
3.3 Životni ciklus novog servisa/proizvoda .....	53
3.4 Difuzioni modeli .....	57
3.4.1 Logistički model.....	60
3.4.1.1 Logistički model definisan na osnovu dve tačke.....	62



3.4.1.2	Logistički model definisan u jednoj tački .....	64
3.4.1.3	Nedostaci logističkog modela.....	64
3.4.2	Richards-ov model.....	64
3.4.3	Rogers-ov model sa klasičnom normalnom raspodelom.....	65
3.4.4	Bass-ov difuzioni model.....	67
3.4.4.1	Karakteristike Bass-ovog modela.....	68
3.4.4.2	Procena parametara Bass-ovog modela.....	73
3.4.4.3	Eksplicitno određivanje parametara Bass-ovog modela.....	74
3.4.4.4	Određivanje parametara Bass-ovog modela pre uvođenja novog servisa/proizvoda na tržište.....	77
3.4.4.5	Kritična masa difuzije novih servisa/proizvoda .....	79
3.4.5	Primena Bass-ovog difuzionog modela u slučaju prognoziranja saobraćajnih zahteva širokopojasnog saobraćaja rezidencijalnog sektora u Republici Srbiji.....	80
4	KARAKTERIZACIJA I MERENJE SAOBRAĆAJA .....	87
4.1	Karakterizacija mrežnog saobraćaja .....	87
4.1.1	Mrežna topologija – uvodni pojmovi .....	87
4.1.2	Pojam saobraćajnog zahteva.....	88
4.1.3	Karakterizacija saobraćaja i $QoS$ .....	90
4.1.4	Pojam kašnjenja u mrežama sa paketskom komutacijom.....	94
4.1.4.1	Kašnjenje na nivou mrežnog linka .....	94
4.1.4.2	Prosečno kašnjenje na nivou putanje, „sa kraja na kraj“ .....	98
4.1.4.3	Prosečno kašnjenje na nivou mreže.....	99
4.1.4.4	Pojam verovatnoće zauzeća.....	99
4.1.4.5	Pojam zagušenja na nivou mreže .....	101
4.1.4.6	Verovatnoća blokiranja kapaciteta .....	102
4.1.4.7	Pojam troškova mreže .....	102
4.1.4.8	Funkcija troškova zagušenja .....	103
4.1.4.9	Primena Funkcije troškova zagušenja i Verovatnoće blokiranja kapaciteta u rešavanju problema proširenja kapaciteta WDM linka .....	105
4.2	Merenje i monitoring mrežnog saobraćaja .....	111
4.2.1	Referentni vremenski periodi .....	112
4.2.2	Saobraćajni profili .....	113
4.2.3	Simple Network Management Protocol .....	114
4.2.4	NetFlow .....	116
4.3	Prognoziranje saobraćaja .....	120

4.3.1	Prikaz saobraćajnih tokova – saobraćajna matrica .....	120
4.3.2	Prognoza saobraćaja od tačke do tačke .....	122
4.3.3	<i>Kruihof</i> -ov metod dvostrukog faktora .....	123
4.4	Osnovni principi dimenzionisanja .....	124
4.4.1	Kontrolisanje preopterećenja mreže .....	126
5	TEHNO-EKONOMSKI PRISTUP PROCESU PLANIRANJA.....	131
5.1	Definisanje obima planiranja za potrebe formiranja tehno-ekonomskog modela.....	132
5.1.1	Prikupljanje ulaznih podataka .....	133
5.2	Razvoj tehno-ekonomskog modela.....	134
5.2.1	Klasifikacija tehno-ekonomskih modela zasnovana na potrebnom nivou detalja .....	135
5.2.1.1	Fracioni modeli.....	136
5.2.1.2	Modeli zasnovani na inicijatoru .....	136
5.2.1.3	Namenski modeli za dimenzionisanje .....	137
5.2.2	Modeli za procenu pada cena opreme tokom vremena .....	141
5.2.2.1	Koncept „krive iskustva“ .....	142
Koncept tzv. „krive iskustva“ .....	142	
5.2.2.2	Kriva logističkog rasta.....	142
5.3	Evaluacija tehno-ekonomskog modela .....	145
5.3.1	Analiza investicije .....	146
5.3.2	Analiza mreže vrednosti .....	149
5.4	Korekcija tehno-ekonomskog modela .....	150
5.4.1	Analiza osetljivosti .....	150
5.4.2	Vrednost realnih opcija.....	151
5.4.2.1	Vrste realnih opcija .....	152
5.4.2.2	Vrednost opcija kao proširenje NPV .....	153
6	METODE OPTIMIZACIJE U PROCESU PLANIRANJA MREŽE.....	154
6.1	Uvod.....	154
6.2	Problemi proširenja kapaciteta mrežnih resursa .....	156
6.2.1	Strategije jednokratnog proširenja mrežnih resursa .....	157
6.2.1.1	Problem proširenja kapaciteta linkova mreže sa ograničenjem budžeta .....	157
6.2.1.2	Problem proširenja modularnih kapaciteta mrežnih linkova .....	159
6.2.2	Strategije serijskog proširenja kapaciteta mrežnih resursa .....	160

6.2.2.1	Strategija proširenja kapaciteta mrežnog linka bazirana na pragu iskorišćenja (T strategija).....	162
6.2.2.2	Strategija serijskog proširenja modularnih kapaciteta mrežnih linkova .....	163
6.2.2.3	Strategija serijskog proširenja kapaciteta mrežnih linkova sa funkcijom troškova zagušenja (CE strategija) .....	164
6.2.2.4	Strategija serijskog proširenja kapaciteta mrežnog linka sa funkcijom troškova zagušenja – heuristički pristup.....	167
6.2.2.5	Unapređena strategija serijskog proširenja modularnih kapaciteta mrežnog linka sa funkcijom troškova zagušenja i mogućnosti prelaska na novu tehnologiju .....	168
6.2.2.6	Unapređena strategija serijskog proširenja modularnih kapaciteta mrežnog linka sa funkcijom troškova zagušenja i mogućnosti prelaska na novu tehnologiju – heuristički pristup .....	174
<b>7</b>	<b>PRIMENA UNAPREĐENE STRATEGIJE NA PROBLEM PROŠIRENJA KAPACITETA WDM LINKA .....</b>	<b>176</b>
7.1	Uvod.....	176
7.2	Koegzistencija fiksne i fleksibilne <i>grid</i> tehnologije .....	178
7.3	Pregled istraživanja.....	179
7.4	Postavka problema i analizirani scenario.....	180
7.5	Primena optimizacionog modela serijskog proširenja modularnih kapaciteta mrežnog linka.....	181
7.6	Prikaz rezultata.....	186
<b>8</b>	<b>ZAKLJUČNA RAZMATRANJA I PRAVCI DALJIH ISTRAŽIVANJA.....</b>	<b>192</b>
8.1	Zaključna razmatranja.....	192
8.2	Doprinosi disertacije .....	193
8.3	Pravci budućih istraživanja .....	194
	LITERATURA .....	196
	PRILOZI.....	211

## PREGLED SLIKA

Slika 1. Planiranje mreže .....	19
Slika 2. Metodologija planiranja mreže – osnovni segmenti planiranja .....	22
Slika 3. Odnos procesa planiranja mreže prema upravljačkim i operativnim aktivnostima .....	23
Slika 4. Iterativnost između planskih procesa .....	24
Slika 5. Relacije između scenarija, procedura, aktivnosti i preporuka .....	24
Slika 6. Proces klasifikacije najpovoljnijeg scenarija .....	25
Slika 7. Odnos faza strateškog i fundamentalnog planiranja .....	28
Slika 8. Odnos aktivnosti koje se primenjuju u okviru srednjoročnih i dugoročnih procesa planiranja.....	32
Slika 9. Uticaj srednjoročnih odluka na profitabilnost i troškove .....	35
Slika 10. Srednjoročno planiranje na nivou jednog vremenskog slota .....	36
Slika 11. Stablo odlučivanja .....	37
Slika 12. Primer usklađenosti(a) i neusklađenosti (b) srednjoročnih planova u odnosu na cilj, postavljen dugoročnim planom.....	40
Slika 13. Podela planskih aktivnosti, prema strukturi slojeva.....	44
Slika 14. Faze procesa planiranja prema slojevima mreže .....	45
Slika 15. Uloga prognoziranja u procesu planiranja komunikacione mreže .....	49
Slika 16. Povezanost procesa prognoziranja i planiranja .....	50
Slika 17. Algoritam korekcije plana ili upravljačke akcije u zavisnosti od rezultata prognoziranja .....	51
Slika 18. Faze životnog ciklusa novog servisa/proizvoda .....	55
Slika 19. Efekti promene parametara (a, b, i m) na oblik "S krive" .....	60
Slika 20. Karakteristične vrednosti i tačke logističkog modela .....	62
Slika 21. Logistički model definisan preko parametara m, $t_s$ , $\Delta t$ , u i v .....	63
Slika 22. Primena Richards-ovog modela za različite vrednosti parametra c .....	65
Slika 23. Kategorije korisnika Rogers-ovog difuzionog modela .....	66
Slika 24. Princip funkcionisanja Bass-ovog modela .....	68
Slika 25. Funkcije Bass-ovog difuzionog modela .....	70

Slika 26. Eksterni i interni uticaj na nivo prihvatanja servisa tokom vremena .....	72
Slika 27. Uticaj promene parametara p i q na brzinu difuzije .....	72
Slika 28. Efekat povećanja parametra inovacije .....	73
Slika 29. Efekat povećanja parametra imitacije .....	74
Slika 30. Trendovi pesimističkog i optimističkog scenarija razvoja .....	79
Slika 31. Ulazni i prognozirani kumulativni broj rezidencijalnih korisnika širokopojsnih usluga za period od 2004. do 2020. godine .....	82
Slika 32. Srednji pristupni kapacitet - statistički podaci i prognozirane vrednost .....	84
Slika 33. Srednja iskorišćenost pristupnih kapaciteta - statistički podaci i prognozirane vrednosti .....	85
Slika 34. Faktor komutacije saobraćaja sa komutacijom kola - statistički podaci i prognozirane vrednosti .....	85
Slika 35. Procenat penetracije broja domaćinstava - statistički podaci i prognozirane vrednosti .....	86
Slika 36. Prognozirane vrednosti saobraćajnih zahteva rezidencijalnog sektora .....	86
Slika 37. Arhitektura QoS .....	94
Slika 38. Uopšteni model za procesiranje paketa u mrežnom čvoru .....	95
Slika 39. Prosečno kašnjenje na nivou bafera u slučaju obrade paketa $L = 500 \times 8$ bits, $u_e=100\text{Mbps}$ .....	98
Slika 40. Model zauzeća linka sa pripadajućim čvorom .....	100
Slika 41. Fortz i Thorup-ova funkcija troškova zagušenja sa prikazanim opsegom penala (0-50), adaptirano na osnovu .....	105
Slika 42. Normalizovani nivoi penala, klasifikovani prema saobraćajnom profilu i godini, za period prognožiranja (2016-2019) .....	110
Slika 43. Saobraćajni profili u slučaju telefonskog (a) i internet saobraćaja (b).....	114
Slika 44. Hijerarhijska organizacija MIB baze.....	115
Slika 45. Netflow - koncept prikupljanja podataka o toku .....	117
Slika 46. Prikaz Nagios NetFlow monitoring interfejsa.....	118
Slika 47. Primer broja opsluženih i neopsluženih (ponovljenih) zahteva iz realnog okruženja .....	128
Slika 48. Dijagram multipliciranja korisničkih zahteva .....	128
Slika 49. Tehno-ekonomski pristup u planskim aktivnostima - ciklični pristup .....	131

Slika 50. Primer FTTH rešenja dobijenog primenom optimizacionih tehnika .....	138
Slika 51. Granulacija opreme i BoM lista .....	138
Slika 52. Primer prikaza procesa, dijagramom toka sa BPMN notacije .....	139
Slika 53. Struktura modelovanja procesa sa eTOM platformom .....	141
Slika 54. Kriva logističkog rasta .....	143
Slika 55. Kriva logističkog rasta - pad cena tokom vremena u slučaju elektronske i mrežne optičke opreme .....	145
Slika 56. Poslovne uloge i akteri u mreži vrednosti .....	149
Slika 57. Primer analize mreže vrednosti – analiza međusobnih uticaja različitih aktera .....	150
Slika 58. Vrednosti troškova zagušenja $cp(l)$ , u odnosu na kapacitet linka $u_l$ , za različite vrednosti parametra $\alpha$ .....	158
Slika 59. Optimalna granica performansi mrežnog resursa između koncepta efikasnosti funkcionisanja mreže i nivoa primene QoS .....	161
Slika 60. CE ilustracija vremenskih parametara kod CE strategije za proširenje kapaciteta za dati horizont planiranja .....	164
Slika 61. Dijagram toka heurističkog pristupa za predloženu strategiju .....	175
Slika 62. Opšti prikaz koncepta DWDM sistema.....	176
Slika 63. Odnos širina kanala u odnosu na zahtev u slučaju fiksne (a) i fleksibilne (b) grid tehnologije.....	177
Slika 64. Grupisanje optičkih puteva u superkanal u fleksibilnim grid mrežama .....	177
Slika 65. Primer koegzistencije čvorova sa fiksnim i fleksibilnim gridom .....	178
Slika 66. Primer proširenja fleksibilnog ostrva migracijom fiksnog grid čvora i pripadajućeg linka .....	181
Slika 67. MTP strategije proširenja za LTP period 2012-2014.....	187
Slika 68. MTP strategije proširenja za LTP period 2015-2017.....	187
Slika 69. MTP strategije proširenja za LTP period 2018-2020.....	188
Slika 70. Opšti prikaz strategije proširenja za LTP periode 2012-2020.....	190
Slika 71. Nivoi zagušenja (%) aktivnih kanala pri različitim stopama pada cene u odnos .....	191

## PREGLED TABELA

Tabela 1.	Pregled uzroka neusklađenosti .....	41
Tabela 2.	Pregled mera za suzbijanje neusklađenosti .....	42
Tabela 3.	Ustanovljene vrednosti parametara p i q Bass-ovog modela za karakteristične servise/proizvode .....	78
Tabela 4.	Broj rezidencijalnih korisnika širokopoljnih usluga u periodu (2004-2015).....	81
Tabela 5.	Lewis-ova skala za procenu tačnosti prognoziranih vrednosti .....	82
Tabela 6.	Rezultati provere prognoziranih vrednosti .....	83
Tabela 7.	Alokacija WDM spektra na linku, u uslovima koegzistencije čvorova sa različitim tehnologijama .....	107
Tabela 8.	Zastupljenost različitih saobraćajnih zahteva u saobraćajnim profilima .....	108
Tabela 9.	Vrednosti iskorišćenja linka i BBR parametra, prema godini i saobraćajnom profilu za period prognoziiranja (2016-2019) .....	109
Tabela 10.	Primer saobraćajne matrice .....	120
Tabela 11.	Uporedni prikaz proračuna profita i proračuna novčanog protoka .....	146
Tabela 12.	Vrste opcija .....	152
Tabela 13.	Kapaciteti linkova po različitim tehnologijama .....	159
Tabela 14.	Uporedni pregled svih proširenja tokom sva tri LTP perioda primenom T i MIP strategije .....	189
Tabela 15.	Nivoi iskorišćenosti (%) aktivnih talasnih dužina pri različitim mesečnim stopama pada cene .....	191

## PREGLED SKRAĆENICA

3G	Third Generation (mobile communication system)
4G/LTE	Fourth-Generation/Long Term Evolution
4K	4K resolution (display resolution)
5G	Fifth-Generation wireless systems
ABC	Activity Based Costing
ACL	Access Control List
ADPFH	Average Daily Peak Full Hour
ADPH	Average Daily Peak Hour
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
ARIMA	Autoregressive Integrated Moving Average
AS	Autonomous System
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BBR	Bandwidth Blocking Ratio
BGP	Border Gateway Protocol
BH	Busy Hour
BoM	Bill-of-Material
BPMN	Business Process Modeling Notation
BV-OXC	Bandwidth Variable Optical Cross-Connect
BVT	Bandwidth Variable Transponder
CapEx	Capital Expenditures
CCA	Current Cost Accounting
CF	Cash Flow
DCF	Discounted Cash Flow
DNS	Domain Name System
DOCSIS	Data Over Cable Service Interface Specification
DoS	Denial-of-Service (attack)
DPB	Discounted Payback Time
DW	Durbin-Watson (test)
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing



---

EBIT	Earnings Before Interest, Taxes
EBITDA	Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation and Amortization
EIRR	Extended Internal Rate Of Return
eTOM	The enhanced Telecom Operations Map
FARIMA	Fractional Autoregressive Integrated Moving Average
FBM	Fractional Brownian Motion
FGN	Fractional Gaussian Noise
Fixed-grid	Fixed Grid (technology)
FLC	Forward Looking Cost
Flex-grid	Flexible Grid (technology)
FN	Future Networks
FO	Fiber Optic
FTTH	Fiber To The Home
FTTx	Fiber to the x
GPS	Generalised Processor Sharing (teletraffic)
GSM	Global System for Mobile Communication
HCA	Historical Cost Accounting
HD	High-Definition (display resolution)
HFC	Hybrid Fibre-Coaxial
ICF	Investing Cash Flow
IETF	Internet Engineering Task Force
ILP	Integer Linear Programming
IMS	IP Multimedia Subsystem
IoT	Internet-of-Things
IP	Internet Protocol
IPFIX	Internet Protocol Flow Information eXport
IPTV	Internet Protocol TeleVision
IPv6	Internet Protocol Version 6
IRR	Internal Rate of Return
IRR	Internal Rate of Return
IT	Information Technologies
ITU	International Telecommunication Union

---

ITU-D	International Telecommunication Union, Development Sector
ITU-T	International Telecommunication Union, Telecommunication Sector
LTP	Long-Term Planning
MA	Metro-Area
MAE	Mean Absolute Error
MAPE	Mean Absolute Percentage Error
MEA	Modern Equivalent Asset
MIB	Management Information Base
MILP	Mixed Integer Linear Programming
MIRR	Modified Internal Rate Of Return
MLE	Maximum Likelihood Estimation
MPLS	MultiProtocol Label Switching
MRTG	Multi Router Traffic Grapher
MTP	Medium-Term Planning
MUX	Multiplexer
NGN	Next Generation Networks
NLS	Nonlinear Least Squares
NPV	Net Present Value
OID	Object Identifier
OLS	Ordinary Least Squares
OpEx	Operational Expenditures
OPNET	OPTimal NETwork performance
OSI	Open Systems Interconnection
OSPF	Open Shortest Path First routing protocol
OXC	Optical Cross-Connects
PB	Payback Time
PDH	Plesiochronous Digital Hierarchy
PSTN	Public Switched Telephone Network
QoS	Quality of Service
RACE	(Plan) > Reach > Act > Convert > Engage (Digital Marketing Planning Framework)
RATEL	Republička agencija za elektronske komunikacije i poštanske usluge

---

ROADM	Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer
ROI	Return on Investment
RSMA	Routing Spectrum Modulation Assignment
SCTP	Stream Control Transport Protocol
SDH	Synchronous Digital Hierarchy
SLA	Service-Level Agreement
SNMP	Simple Network Management protocol
STP	Short-Term Planning
SWOT	Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats
TCBH	Time Consistent Busy Hour
	Tool for Introduction scenario and Techno-economic evaluation of Access
TITAN	Network (project)
TMF	TeleManagement Forum
UDP	User Datagram Protocol
VDSL	Very-high-bit-rate Digital Subscriber Line
VLAN	Virtual Local Area Network, Virtual LAN
VoIP	Voice over Internet Protocol
WACC	Weighted Average Cost of Capital
WANDL	Wide Area Network Design Laboratory
WDM	Wavelength Division Multiplexing
Wi-Fi	Wireless-Fidelity (IEEE 802.11)
WMI	Windows Management Instrumentation
WoM	Word-of-Mouth
XSPDL	XML Process Definition Language

# 1 UVODNA RAZMATRANJA

## Motivacija

Savremeno društvo, u drugoj dekadi 21. veka, karakterišu ogromne promene načina života koje se, pre svega, odnose na način komunikacije među ljudima. Ove promene odnose se, ne samo na način direktne komunikacije između osoba, već i na sveukupnu interakciju sa okruženjem, koja se možda po prvi put skoro u potpunosti odvija posredstvom komunikacionih tehnologija. Brzina i stil života uslovljeni su nivoom prisustva pametnih uređaja, dizajniranih sa zadatkom da se korisnicima, u najkvalitetnijem obliku i na najbrži način, dostave željene informacije i obezbedi mogućnost reakcije na različite načine. U realizaciji ovih zadataka, ključnu ulogu imaju informaciono-komunikacione tehnologije, koje predstavljaju osnovu za funkcionisanje savremenih servisa, baziranih na upotrebi Internet-a.

Savremeni internet servisi bazirani su na konceptu *online* tehnologija. Prenos podataka vezan je za sve oblike međusobne komunikacije između ljudi, kao i uređaja i sve više se oslanja na upotrebu *Cloud* tehnologija. U ovim oblicima komunikacije, učestvuju i *Internet-of-Things* (IoT) uređaji, organizovani kroz različite oblike senzorskih i drugih mreža, na kojima se bazira rad mnogih pametnih (*smart*) ekosistema. Pored toga, prenos multimedijalnih sadržaja poput zvuka i video zapisa realizuje se, po pravilu, u rezoluciji visoke (HD i 4K) definicije, gde se može uočiti dominantno učešće tzv. pametnih multimedijalnih uređaja, poput pametnih telefona, tablet uređaja ili televizora, koji osim mobilnih servisa četvrte (4G/LTE) i buduće pete generacije (5G) koriste i širokopojasne servise, namenjene rezidencijalnom sektoru.

Osnovni nosilac navedenog dinamičkog okruženja predstavljaju multiservisne širokopojasne telekomunikacione mreže, za koje je vezan permanentni zadatak zadovoljavanja rastućih zahteva korisnika za uvođenjem novih servisa. Struktura i obim servisa definisana je, pre svega, trendovima na opštem tržištu, koje u punom obimu koristi mogućnosti direktne komunikacije sa korisnicima. Navedene činjenice ukazuju na dominantno prisustvo tzv. digitalnog tržišta, za koje se kao jednu od osnovnih karakteristika može vezati stepen prihvatanja ponuđenih proizvoda/servisa od strane

internet korisnika. Nivo prihvatanja, kao identifikovana veličina, ima direktan uticaj na raspoloživost mrežnih kapaciteta, bilo da se radi o pristupnim mrežama, ili su u pitanju mreže magistralnih (*backbone*) linkova. Shodno navedenom, raspoloživost mrežnih resursa dovodi se u usku vezu sa planiranjem mrežnih kapaciteta, pojedinačno, po svakom elementu mreže, kao i u celini.

### Istraživački ciljevi

Efikasno upravljanje komunikacionom mrežom ogleda se u održavanju optimalnog odnosa stepena iskorišćenosti raspoloživih kapaciteta i nivoa upotrebe QoS (*Quality of Service*) mehanizama radi obezbeđenja zahtevanog kvaliteta servisa. Praksa je pokazala da nakon određenog vremena, raspoloživi mrežni kapaciteti postaju nedovoljni da bi se zadovoljile potrebe korisnika za određenom vrstom servisa. Ako, pod navedenim okolnostima, stepen kontrole saobraćaja (nivo primene QoS) pređe dozvoljenu granicu, tada efekat QoS postaje zanemarljiv, zbog nemogućnosti eliminacije efekta „uskog grla“ (*bottleneck*) na pojedinim linkovima. Ovo se može preduprediti blagovremenom primenom odgovarajuće strategije za proširenjem mrežnih kapaciteta, najčešće bazirane na rezultatima primene odgovarajućih metoda za prognoziranje saobraćaja. Imajući u vidu da dinamika rasta saobraćajnih zahteva može prouzrokovati nezadovoljavajući efekat primenjene strategije proširenja kapaciteta, neophodno je formirati dodatne mehanizme u strategiji, kojima se može reagovati na uočenu degradaciju performansi mreže. Takva reakcija obično uključuje zamenu tehnologija novijom generacijom ili drugi vid radikalnih zahvata, koji po pravilu, zahteva i veći nivo investicija.

Shodno navedenom, primarni cilj istraživanja je razvoj modela za unapređenje postojećih strategija za proširenje kapaciteta mreže, kako bi se minimizirali troškovi eksploatacije telekomunikacione mreže, a povećala informaciona propusnost mreže pri očuvanju karakteristika QoS.

Model, koji treba razviti u okviru ove disertacije, uključuje mogućnost za reaktivno donošenje odluke u slučaju promene dinamike rasta saobraćajnih zahteva, koja se odnosi na zamenu tehnologija, sa ciljem da se sačuva nivo performansi posmatranog sistema. Pored navedenog, potrebno je ispitati i mogućnost upotrebe

drugih parametara, koji se primenjuju u procesima planiranja, a koji mogu imati ulogu indikatora promene dinamike rasta saobraćajnih zahteva. Na ovaj način, verovatnoća pojave navedenog efekta „uskog grla“, dodatno se minimizira, kao i potencijalni gubici.

## Struktura disertacije

Doktorsku disertaciju, pored opštih sastavnih delova, čine i sledeće strukturne celine:

U prvom poglavlju, predstavljena su uvodna razmatranja u kojima je navedena motivacija za sprovođenje istraživanja, ciljevi istraživanja, struktura disertacije i polazne hipoteze, na kojima se zasniva istraživanje.

U drugom poglavlju, predstavljena je metodologija planiranja telekomunikacione mreže, u kojoj je pružen osvrt na klasifikaciju planskih aktivnosti u vremenskom okviru, kao i po slojevima mreže. Pored navedenog, prikazan je pristup rešavanju planskih problema, baziran na stepenu kompleksnosti postavljenih zadataka. Pored toga u navedenom poglavlju je pružen osvrt i na probleme neusklađenosti planskih ciljeva, postavljenih na nivou različitih vremenskih okvira<sup>1</sup>, kao i metodološki pristup, koji se odnosi na načine njihovog rešavanja.

U trećem poglavlju, prikazana je metodologija prognoziranja tražnje na telekomunikacionom tržištu, u okviru koje je predstavljena uloga i značaj primene metoda prognoziranja u planskim procesima, zatim karakteristike procesa prihvatanja nivoa servisa, koje su bitne za realizaciju ciljeva, postavljenih na nivou strateškog planiranja jedne mreže, kao i osnovne karakteristike životnog ciklusa telekomunikacionih servisa. Poseban osvrt je pružen na pregled difuzionih modela, među kojima, posebnu važnost ima *Bass-ov* model, koji je primenjen u okviru predstavljenog istraživanja.

U četvrtom poglavlju, pružen je osvrt na bitne parametre, kojima se može opisati mrežni saobraćaj, što uključuje i različite pojmove, koji su od važnosti za karakterizaciju mrežnog saobraćaja. U poglavlju je pružen i osvrt i na metodologiju

---

<sup>1</sup> Poglavlje 2.1

merenja saobraćaja, kao i na najvažnije protokole i tehnologije, koji su bitni za efikasan nadzor saobraćajnih parametara. Poglavlje pruža osvrt i na prognoziranje saobraćaja, koje se sprovodi na osnovu ulaznih podataka, dobijenih u procesu merenja saobraćaja, kao i na osnovne principe dimenzionisanja mreža.

U petom poglavlju, prikazane su metode planiranja, posmatrano sa tehnno-ekonomskog aspekta, u kojima je pružen osvrt na modele za procenu cena opreme tokom vremena, zatim na pristup i klasifikaciju planskih modela, evaluaciju investicija i troškova, kao i korekzione metode za postizanje boljih ekonomskih performansi posmatrane mreže.

U šestom poglavlju, prikazane su metode optimizacije, koje se odnose na rešavanje problema na nivou topologije mreže, kao i saobraćajnih tokova. Poseban osvrt je pružen na primenu metoda optimizacije prilikom rešavanja problema proširenja kapaciteta resursa mreže.

Konačno u sedmom poglavlju su predstavljena zaključna razmatranja vezana za istraživani problem, kao i primenjena rešenja.

## **Polazne hipoteze**

Na osnovu predstavljenog problema, neophodno je razmotriti uvođenje takve dugoročne strategije proširenja mrežnih kapaciteta uz mogućnost promene tehnologije usled rekonfiguracije posmatrane mreže. Tada, za pripadajuće srednjoročne periode, raspoloživi budžet može biti modelovan na takav način da je, u okviru strategija proširenja kapaciteta resursa mreže, moguće uključiti i opciju promene tehnologije. Promenu tehnologija na nivou posmatrane mreže je moguće izvršiti kompletno ili parcijalno, pri čemu treba imati u vidu da je jednokratna zamena tehnologija na nivou celokupne mreže manje prihvatljiva opcija, odnosno da investitorima više odgovara parcijalna nadgradnje mreže. Imajući u vidu činjenicu da pad cena novih tehnologija u toku vremena, podleže istim zakonima koji važe i za starije tehnologije, interes investitora podrazumeva što dužu eksploataciju već uvedenih tehnologija (jer se želi što veći obrt realizovanih investicija, sve do momenta kada opcija zamene tehnologije postaje neizbežna alternativa).

Shodno navedenom, neophodan je razvoj strategije proširenja mrežnih kapaciteta, koja uključuje mogućnost uvođenja nove mrežne tehnologije u eksploataciju, po istim principima koji važe za uvođenje mrežnih komponenti za proširenje kapaciteta u okviru već primenjenih tehnologija.

Prognoziranje saobraćajnih zahteva se, po svojoj prirodi, vrši sa pretpostavkom da postoji određen nivo neizvesnosti, koji raste u skladu sa dužinom vremenskog okvira za primenu metoda prognoziranja. Da bi se umanjili efekti uticaja neizvesnosti na proces planiranja, uobičajena je praksa da se, sa povećanjem zadatog vremenskog okvira planiranja, smanjuje nivo zahtevane detaljnosti prilikom razrade planskih dokumenata. Pošto se kombinovanom primenom odgovarajućih metoda, vezanih za prognoziranje tražnje na telekomunikacionom tržištu mogu dobiti prognozirane vrednosti saobraćajnih zahteva, postavljena je hipoteza da se primenom odgovarajućih parametara, koji figurišu u procesima karakterizacije saobraćaja, može uticati na smanjenje neizvesnosti.

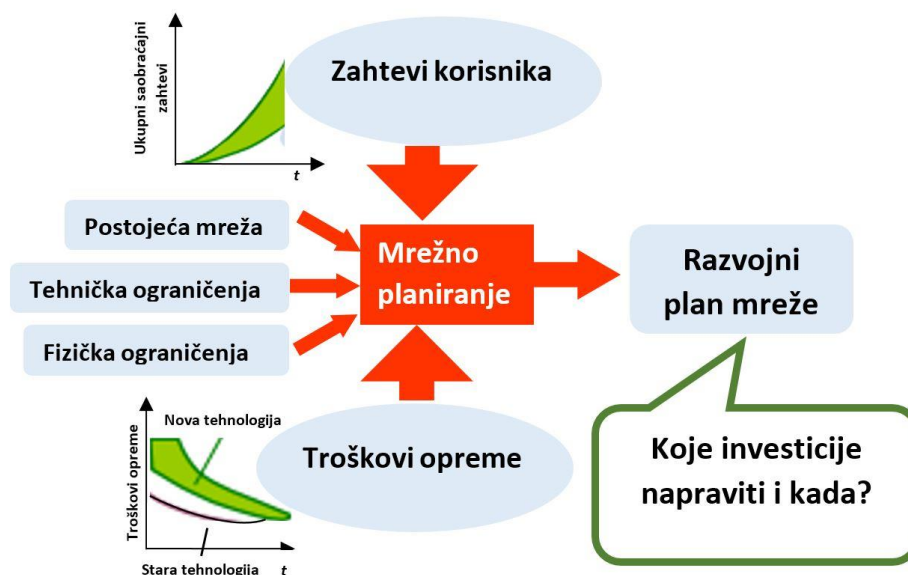


## 2 METODOLOGIJA PLANIRANJA MREŽE

Problem planiranja kapaciteta mreže može se okarakterisati kao veoma složen zadatak, sa širokim spektrom kriterijuma koje je potrebno zadovoljiti, da bi se postiglo zadovoljavajuće rešenje. Širina problematike koja se odnosi na proširenje kapaciteta mreže utiče i na činjenicu da ne postoji jedinstvena definicija problema planiranja kapaciteta resursa mreže. Prema radu [1], zadatak planiranja mreže predstavlja pronalaženje najboljeg mogućeg odnosa između nivoa troškova implementacije mreže, mrežne fleksibilnosti, raspoloživosti mreže sa ciljem da se zadovolje zahtevi korisnika servisa, kao i topološka ograničenja. U radu [2] planiranje mrežnih kapaciteta predstavljeno je kao proces određivanja obima i strukture mrežnih resursa, neophodnih za prevenciju uticaja raspoloživosti i performansi na rad aplikacija koje su kritične za realizaciju biznisa. U slučaju konkretnih zadataka, kao što je planiranje kapaciteta tzv. jezgra (*core*) mreže, rad [3] definiše proces planiranja mrežnih kapaciteta kao proces kojim se obezbeđuje takav nivo protoka, dovoljan da zadovolji ugovorene kriterijume kvaliteta servisa (definisane kroz *Service-Level Agreement*, tj. *SLA*). Imajući u vidu aspekt poslovanja, u radu [4] definiše se planiranje mreže kao grupa procesa koji imaju veliku važnost za jednog mrežnog operatora, jer se na osnovu usvojenih planova mogu projektovati nivoi profita, troškova, kao i investicija. Međunarodna unija za telekomunikacije (ITU), u preporuci E.175 [5], navodi da planiranje mreže obuhvata definisane aktivnosti, u okviru planskog modela, kojim se izbegava niz kratkoročnih planskih opcija koje dugoročno mogu projektovati mrežu sa visokim troškovima eksploatacije [5].

Shodno navedenom, može se zaključiti da je planiranje, ne samo primarna, već i suštinska aktivnost procesa upravljanja telekomunikacionom mrežom, jer se u ovoj aktivnosti definišu glavni pravci funkcionisanja mrežnog operatora (telekom kompanije) u skladu sa unapred definisanom misijom i vizijom. Planiranje može da se opiše kao proces definisanja ciljeva i određivanja metoda pomoću kojih se ti ciljevi realizuju. Planiranje se realizuje u vremenskim intervalima, započinje sagledavanjem zahteva korisnika, postojeće konfiguracije mreže i tehničkih ograničenja, nastavlja se preduzimanjem odgovarajućih razvojnih planova, a završava se praćenjem efekata

preduzetih akcija. Na ovaj način se smanjuje rizik i posledice budućih aktivnosti, koje se preduzimaju radi ostvarenja unapred definisanih organizacionih ciljeva. Na Slici 1 prikazan je uticaj različitih faktora na planiranje mreže.



Slika 1. Planiranje mreže [6]

Ishod procesa planiranja, predstavlja razvojni plan mreže, koji obuhvata predlog za preduzimanje odgovarajućih aktivnosti, kao i procenu troškova koje sprovođenje posmatranog plana podrazumeva. Plan obično uključuje i alternativne pravce u preduzimanju određenih aktivnosti. Usklađenost svih aktivnosti sa predviđenim vremenom je od prevashodnog značaja. Postoji dugoročno, srednjoročno i kratkoročno planiranje, od kojih svako ima svoje sopstvene zahteve koji se tiču detaljnosti i nivoa planiranja mreže. Neophodno je naglasiti da svaki vid planiranja mora koristiti pouzdanu prognozu zahtevanih ulaznih veličina.

Raznolikost problema vezanih za planiranje u telekomunikacionim sistemima, uslovalo je pojavu niza ITU-T preporuka, koje se odnose na planiranje, merenje saobraćaja, prognoziranje i druga važna pitanja iz ove oblasti [5], [7-23].

Pored toga, modeli za planiranje telekomunikacionih mreža, u velikoj meri zavise i od stepena industrijskog i društvenog razvoja pojedinačnih regiona ili zemalja, što je i definisalo fokus regionalnih aktivnosti Sektora za razvoj Međunarodne unije za telekomunikacije (ITU-D) [24].

U skladu sa navedenim definicijama, planiranje mreže može se predstaviti kao proces koji uključuje sve aktivnosti vezane za razvoj jedne mreže, neophodne da bi se obezbedili resursi dovoljni za realizaciju očekivanih saobraćajnih zahteva, u skladu sa datim tehničkim i ekonomskim ograničenjima. Planiranje ima za cilj da se zadovolje sve potrebe mrežnog operatora, posmatrano sa poslovnog, infrastrukturnog i operativnog stanovišta. Imajući navedeno u vidu, potrebno je rešiti različite zadatke, koje treba imati u vidu tokom planskih aktivnosti, a koji se mogu uopšteno klasifikovati na sledeći način [25]:

I. zadaci koji se odnose na poslovanje/biznis:

- definisanje korisničkih segmenata za plasman multimedijalnih servisa;
- struktura novih servisa koji se mogu plasirati na tržištu;
- definisanje servisnih paketa po tipu korisnika;
- kako uvećati udeo na tržištu;
- kako maksimizirati prihode;
- kako umanjiti nivo kapitalnih troškova (CapEx) i
- kako umanjiti nivo operativnih troškova (OpEx) ;

II. zadaci koji se odnose na pitanja mrežne infrastrukture i saobraćaja:

- kako izvršiti prognoziranje zahteva koji se odnose na multimedijalnu ponudu, kao i ostale tipove saobraćaja;
- broj čvorova neophodnih za infrastrukturu mreže;
- izbor arhitekture, rešavanje pitanja rutiranja;
- definisanje odnosa eksploatacije infrastrukture u vlasništvu i one koja se iznajmljuje od drugih operatora;
- pitanja koja se odnose na migraciju optičkih mreža ka novim tehnologijama;
- pitanja konvergencije u slučaju pristupnih mreža i novih servisa;
- pitanja koja se odnose na obezbeđivanje realizacije servisa sa unapred ugovorenim nivoom kvaliteta, definisanim kroz *Service*

*Level Agreement (SLA)*, kao i pitanja koja se odnose na bezbednost mreža;

### III. zadaci na operativnom nivou:

- pitanja koja se odnose na izbor alternativa između sopstvenih operativnih resursa i outsourcing-a;
- pitanja koja se odnose na organizaciju i projektovanje novih operativnih procesa;
- pitanja koja se odnose na izbor IT resursa i aplikacija neophodnih za podršku operativnim procesima;
- pitanja koja se odnose na obuku zaposlenih za nove operativne procese.

Imajući u vidu navedene potrebe, mogu se izdvojiti sledeći kriterijumi, na osnovu kojih se može sprovesti planiranje jedne mreže [26]:

- tražnja za servisima i saobraćajno opterećenje u posmatranom periodu (opterećenje čvorova i linkova bazira se na rezultatima merenja saobraćaja i prognoziranim vrednostima);
- potreban kapacitet kao funkcija rasta zahteva za servisima i neophodnog vremena instalacije, kao i adekvatna rezerva sistema;
- pronalaženje optimuma između zahteva u pogledu kvaliteta usluge (QoS) i troškova, što rezultuje modeliranjem saobraćaja za zadati QoS, čime se poboljšava efikasnost rada posmatrane mreže, kao i nivo zaštite od zagušenja;
- prisustvo *Service Level Agreement*-a (SLA), kojim se definišu garancije za sposobnost mreže/protokola da pruži odgovarajuće performanse.

Ovo se može postići sagledavanjem metodologije planiranja mreže kroz pet metodoloških segmenata: prognoziranje zahteva korisnika, karakterizacija i merenje saobraćaja, tehno-ekonomske aspekte, metode optimizacije, kao i metode vezane za razvoj mrežne arhitekture i primene odgovarajućih tehnologija [27], kao što je prikazano na Slici 2.



Slika 2. Metodologija planiranja mreže – osnovni segmenti planiranja [25]

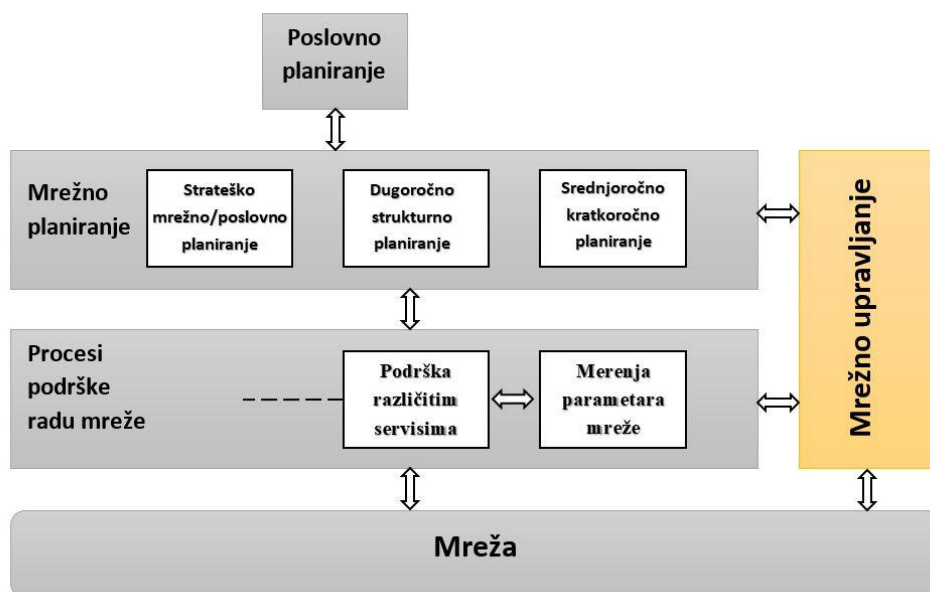
Svi segmenti planiranja mreže međusobno su povezani i zato se sprovode u iterativnom postupku i paralelno jedan sa drugim.

Proces planiranja mreže može se posmatrati sa različitih aspekata [4]:

- prema vremenskom okviru,
- prema mrežnom sloju,
- prema segmentu mreže,
- prema geografskoj regiji,
- prema mrežnoj tehnologiji,
- prema grupi servisa,
- prema nivou detaljnosti i sl.

Problemi planiranja mreže mogu obuhvatati različite kombinacije navedenih aspekata, kako po pojedinačnim strukturama, tako i po obimu, zavisno od zahtevanog nivoa detaljnosti. Na Slici 3 prikazan je međusobni odnos različitih procesa planiranja mreže prema upravljačkim i operativnim aktivnostima. Poslovni interesi jednog operatora, na dugoročnom nivou, najpre se mogu reflektovati kroz smernice nastale u procesu poslovnog planiranja. Proces formiranja planova poslovanja ima uzajamni odnos sa procesima planiranja jedne ili više telekomunikacionih mreža, konkretno sa onim procesima koji se odnose na dugoročno mrežno planiranje, što nadalje ima uticaj i na planske aktivnosti, na srednjoročnom i kratkoročnom nivou, u smislu dostizanja

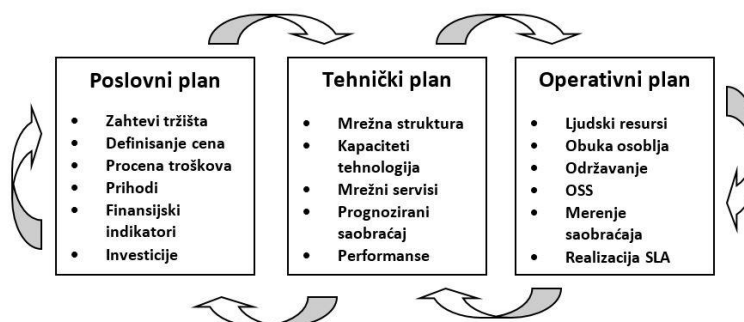
postavljenih ciljeva. Aktivnosti koje se odnose na planiranje posmatrane mreže, takođe imaju dvosmeran (iterativni) odnos sa svim onim aktivnostima koje su vezane za procese kojima je podržan rad posmatrane mreže (počevši od merenja parametara mreže, pa do procesa koji podržavaju rad različitih servisa). Na kraju, procesi planiranja i podrške radu posmatrane mreže reflektuju se, kako na upravljanje posmatranom mrežom, tako i na samu mrežu (topologiju, primenjene tehnologije, mehanizme upravljanja saobraćajem i uvedene servise).



Slika 3. Odnos procesa planiranja mreže prema upravljačkim i operativnim aktivnostima [25], [27]

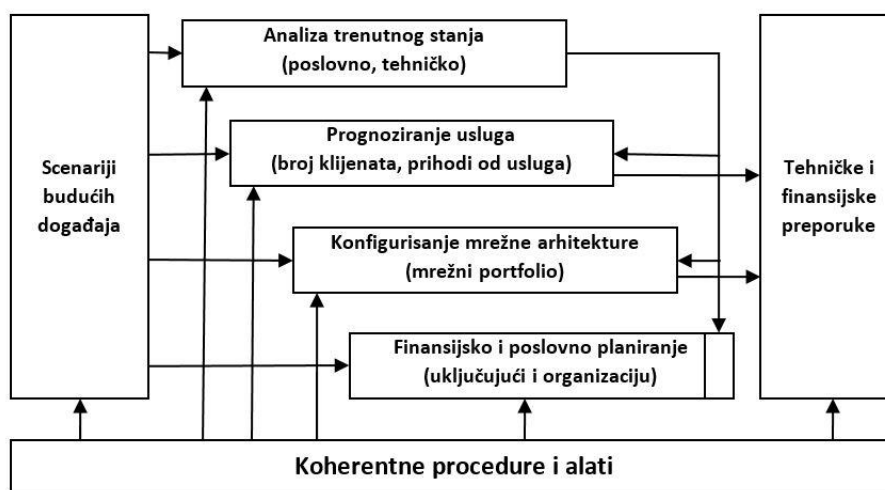
Iterativnost između procesa planiranja mreže i sistema za podršku planiranju, sa jedne strane i upravljačkih i operativnih aktivnosti, sa druge, ima ključni značaj za uspešno rešavanje problema planiranja, jer se kroz dvosmeran tok informacija mogu analizirati rezultati uticaja procesa planiranja na posmatranu mrežu i preduzimati odgovarajuće korekcije, u cilju postizanja željenih rezultata. Posmatrajući proces planiranja kroz tehno-ekonomsku prizmu, koja odslikava investicione interese mrežnog operatora, iterativnost se može posmatrati kroz relacije između trenutnog tehno-ekonomskog stanja mreže, finansijskih aspekata, prognoziranja (broja korisnika, njihovih zahteva, kao i stepena prihvatanja novih servisa), kao i tehničkih rešenja, na

osnovu čega se mogu formirati različiti scenariji mogućih pravaca razvoja (Slika 4). Iterativni pristupom se postiže konsolidacija dobijenih rezultata.



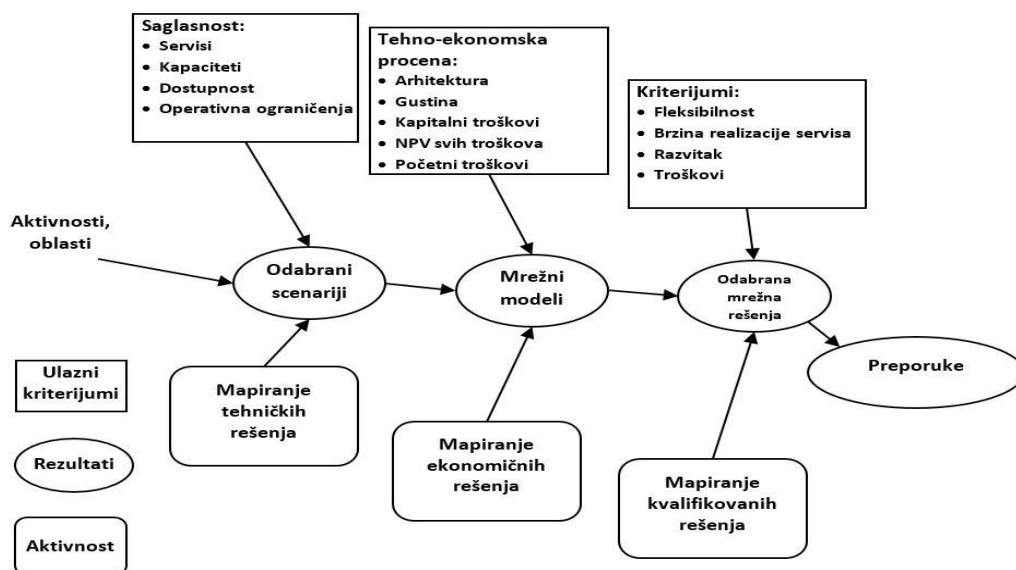
Slika 4. Iterativnost između planskih procesa [26]

Primenom odgovarajućih procedura i alata, vrši se klasifikacija budućih scenarija prema nivou tehno-ekonomskih efekata koji mogu biti dostignuti (Slika 5).



Slika 5. Relacije između scenarija, procedura, aktivnosti i preporuka [28], [4]

Na osnovu predloženih scenarija, usvaja se set preporuka vezanih za razvoj posmatrane mreže, koje mrežni operator mora sprovesti da bi ostvario željene rezultate (Slika 6).



Slika 6. Proces klasifikacije najpovoljnijeg scenarija [27]

Klasifikacija identifikovanih scenarija vodi ka identifikaciji mrežnih modela, gde se procesom selekcije, među mogućim mrežnim rešenjima izdvaja ono najefikasnije rešenje za koje se formira odgovarajući set preporuka.

## 2.1 Klasifikacija planskih aktivnosti na osnovu vremenskog aspekta

Struktura i nivo složenosti planiranja mreže, kao i aktivnosti koje se sprovode da bi se postavljeni zadaci rešili, razlikuju se u zavisnosti od posmatranog vremenskog okvira (horizonta). Treba naglasiti da navedene razlike ne uzrokuju striktno podele među planiranim aktivnostima, već formiraju odgovarajuće relacije između njih. U osnovi postoje dva koncepta planiranja razvoja telekomunikacionih mreža u pogledu različitog vremena realizacije i troškova:

- **Green field pristup** (sprovodi se uvek pre izgradnje nove telekomunikacione mreže; sam postupak realizacije mreže podrazumeva prikupljanje svih neophodnih podataka koji se odnose na prognozirani intenzitet saobraćaja, troškove, kvalitet, pouzdanost mreže i primenu odgovarajućih aktivnosti na očuvanju definisane pouzdanosti za zadati projektovani kapacitet mreže) i



- **Brown field pristup, odnosno proširenje kapaciteta** postojeće infrastrukture mreže.

Proširenje kapaciteta obično je motivisano porastom broja korisnika i ukupnog obima saobraćaja, uvođenjem novih servisa, prelaskom na širokopojasni pristup, uvođenjem novih tehnologija u pristupnom delu mreže od prethodno instaliranih i dr.

U zavisnosti od posmatranog vremenskog okvira, aktivnosti planiranja mogu biti grupisane kao [26]:

- **dugoročno (strateško) planiranje** (*Long-term planning*, LTP) predstavlja set planskih aktivnosti koje imaju za cilj da definišu i dimenzionišu delove mreže koje karakteriše dugoročna funkcionalnost i kapitalne investicije. Dugoročno planiranje podrazumeva grupu planskih aktivnosti koje se razmatraju za vremenski okvir (vremenski horizont), najčešće, u trajanju do 5 godina. Smatra se da je, u okviru ovog vremenskog horizonta, prisutan visok nivo neizvesnosti.
- **srednjoročno (taktičko) planiranje** (*Medium-term planning*, MTP) predstavlja set planskih aktivnosti kojima se postojeća mreža dovodi do stanja, definisanog u ciljevima dugoročnog planiranja. U ovom slučaju, fokus aktivnosti usmeren je na karakteristike elemenata mreže, poput čvorova, linkova, delova posmatrane mreže (tzv. podmreža) sa akcentom na rešavanje problema rutiranja i kapaciteta elemenata mreže u okviru posmatranog prostornog domena. Srednjoročno planiranje podrazumeva grupu planskih aktivnosti koje se odnose na vremenski horizont (najčešće) u trajanju do jedne godine. U okviru navedenog vremenskog perioda prisutan je određeni nivo neizvesnosti, koji je obično veoma mali. Prostorni domen, obuhvaćen jednim srednjoročnim planom, je obično ograničen na jednu ili više podmreža.
- **kratkoročno planiranje** (*Short Term Planning*, STP) predstavlja set planskih aktivnosti vezanih za rešavanje operativnih problema radi dostizanja ciljeva definisanih srednjoročnim planovima. Kratkoročne planske aktivnosti su ograničene na upotrebu već instaliranih kapaciteta, bez dodatnih kapitalnih ulaganja u mrežu. Kratkoročni planovi obavezno sadrže preciznu vremensku

dimenziju, kojom je opisano kada se određene aktivnosti, definisane planovima, sprovode.

### 2.1.1 Dugoročno planiranje

Dugoročno planiranje podrazumeva definisanje topologije telekomunikacione mreže, odabir odgovarajuće tehnologije i dimenzionisanje kapaciteta svih elemenata mreže, sa stanovišta dugoročnog radnog veka, kao i neophodnih investicija za implementaciju. Navedenim aktivnostima se zadaju ciljevi koje treba realizovati a koji ujedno predstavljaju i smernice za sprovođenje aktivnosti koje se odnose na srednjoročno planiranje [26].

Projektovanje topologije telekomunikacione mreže podrazumeva način međusobnog povezivanja čvorova u mreži. Optimalna topologija mreže dobija se primenom teorije grafova (*Graph Theory*). Ove metode treba da uključe troškove i kapacitet medijuma za prenos i komutacionih uređaja kao kriterijum za optimizaciju. Projektovanje sastavnih elemenata mreže podrazumeva određivanje optimalnog kapaciteta elemenata mreže, što podrazumeva određivanje minimalnog zahtevanog kapaciteta tako da se zadovolje zahtevi *QoS*.

Proces dimenzionisanja resursa mreže obuhvata određivanje optimalne topologije mreže, plana rutiranja, prognoziranje saobraćajne matrice, *QoS* zahteve, na osnovu kojih se određuje maksimalni kapacitet elemenata mreže. *QoS* (uobičajeno izražen preko parametara kao što su protok, kašnjenje, varijacija kašnjenja, verovatnoća gubitka paketa i dr.) predstavlja sposobnost mreže da obezbedi različite prioritete za različite aplikacije, korisnike ili odgovarajući protok podataka. Posebno je važan kada je nedovoljan kapacitet mreže i za aplikacije u realnom vremenu (*Voice over Internet Protocol* - VoIP, *Internet Protocol Television* - IPTV, video konferencija i sl.). Ovaj proces zahteva složeni model koji simulira ponašanje mreže i protokola za rutiranje. U ove svrhe se koriste poznati softverski alati (OPNET<sup>2</sup>, WANDL<sup>3</sup>, VPISystems<sup>4</sup> i sl.).

---

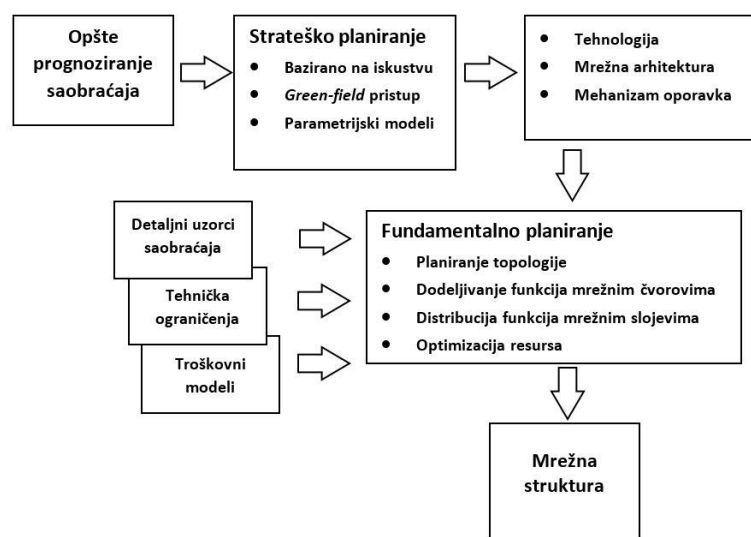
<sup>2</sup> OPNET (*OPTimal NETwork performance*) - najpoznatiji simulator performansi mreže, aplikacija i protokola.

<sup>3</sup> WANDL (*Wide Area Network Design Laboratory*) - vodeći distributer softvera za napredno planiranje, upravljanje i optimizaciju resursa komunikacionih mreža.

<sup>4</sup> VPISystems - Vodeći distributer softvera za prediktivnu analizu uticaja mreže na komunikacione servise.

Dugoročno planiranje se sastoji od aktivnosti, koje se realizuju u dve faze, različite i po načinu pristupa (Slika 7) [25], [26]:

1. Strateško (perspektivno) planiranje predstavlja fazu, u kojoj se teži ka definisanju rešenja koja se odnose na arhitekturu i primenu odgovarajućih tehnologija, na nivou posmatrane mreže. Navedena rešenja predstavljaju rezultat komparativnih analiza mogućih scenarija (Slika 6), zasnovanim na ekspertskom mišljenju, a koja bi trebalo da zadovolje kriterijume, postavljene za navedenu mrežu. Generalno, strateško planiranje uključuje metode tipične za tzv. *green-field* pristup, gde se dimenzionisanje vrši za potpuno novu telekomunikacionu mrežu. Ove metode podrazumevaju primenu različitih parametarskih modela, opisanih u radovima [29-32].
2. Fundamentalno planiranje definiše strukturu posmatrane mreže na bazi arhitekture i odabranih tehnologija u fazi strateškog planiranja. U ovoj fazi se razmatraju problemi dodeljivanja funkcija čvorovima mreže, problemi vezani za planiranje topologije mreže, sjedinjavanje funkcija na različitim slojevima mreže, kao i definisanje optimalne strukture mreže. Zbog velikog značaja, odnosno uticaja na ishod, ova faza se nalazi u fokusu aktivnosti vezanih za dugoročno planiranje [25], [26].



Slika 7. Odnos faza strateškog i fundamentalnog planiranja [25], [26]

Ulazni podaci za realizaciju aktivnosti koje pripadaju dugoročnom planiranju su [25], [26]:

- prognozirane vrednosti saobraćajnih zahteva na nivou jediničnog LTP perioda;
- podaci o mogućim lokacijama čvorova mreže. Ukoliko se radi o *green-field* investiciji, koja se odnosi na uključivanje novog mrežnog operatora na tržište, onda ove lokacije mogu biti kategorizovane kao nove ili kao već postojeće (koje pripadaju operaterima u ulozi partnera);
- podaci o mogućim rutama za fizičku realizaciju linkova;
- topologija mreže na nivou pripadajućih domena, kao i drugih aspekata, kojima se obezbeđuje željena funkcionalnost, poput redundantnosti, agregacije saobraćaja, zaštite/restauracije i opših kriterijuma rutiranja koji će se koristiti;
- troškovi elemenata mreže i izgradnje infrastrukture mreže, pri čemu je uobičajeno da se u procesu minimizacije troškova koriste nediskontovane vrednosti opreme.

U okviru aktivnosti vezanim za dugoročno planiranje, ITU [25] preporučuje da preciznost kalkulacija nivoa troškova bude ekvivalentna preciznosti za prognozirane nivoe zahteva na dugoročnom nivou. S obzirom da dugoročno prognožiranje, po pravilu daje agregirane i aproksimativne podatke, smatra se da i nivo troškova takođe ne mora imati visoku preciznost, zbog čega se preporučuje pojednostavljenije procedura proračuna troškova eksploatacije i proširenja [26]. Vremensko razdoblje koje se odnosi na dugoročno planiranje, na osnovu istih preporuka, treba da iznosi 3 do 5 godina, pri čemu se preporučuje revizija planova u slučaju značajnih promena u odnosu na nivoe prognoziranih zahteva, ili u slučaju značajnih promena koje se odnose na primenjene tehnologije ili standarde.

### 2.1.2 Srednjoročno planiranje

Srednjoročno planiranje definiše plan proširenja kapaciteta čvorova i linkova mreže predviđenih u okviru LTP strategije razvoja [26]. Aktivnosti vezane za srednjoročno planiranje koncipiraju se u vremenskom domenu, na skali izdelfjenoj na

veći broj perioda. Ovaj koncept pruža mogućnost nadgradnje resursa u koracima, u posmatranim periodima, sa zadatkom dostizanja ciljeva ustanovljenim u procesu planiranja na dugoročnom nivou (LTP ciljeva).

Prema ITU [25], aktivnosti vezane za srednjoročno planiranje trebale bi da generišu sledeće rezultate, koje se odnose na svaki pojedinačni vremenski period:

- detaljan pregled rutiranja i agregacije saobraćaja prema saobraćajnim zahtevima, bez dovođenja u konflikt sa kriterijumima postavljenim na nivou dugoročnog planiranja;
- oprema u čvorovima, kao i sistemi prenosa koji trebaju biti instalirani ili deinstalirani u okviru korespondentnog vremenskog perioda, a prema rezultatima prognoziranja nivoa zahteva u okviru grupe čvorova i infrastrukture, za koje je sprovedeno dugoročno planiranje;
- plan proširenja kapaciteta, kao i odlaganja nadgradnje ili instalacije novih komponenti, u skladu sa budžetskim ograničenjima.

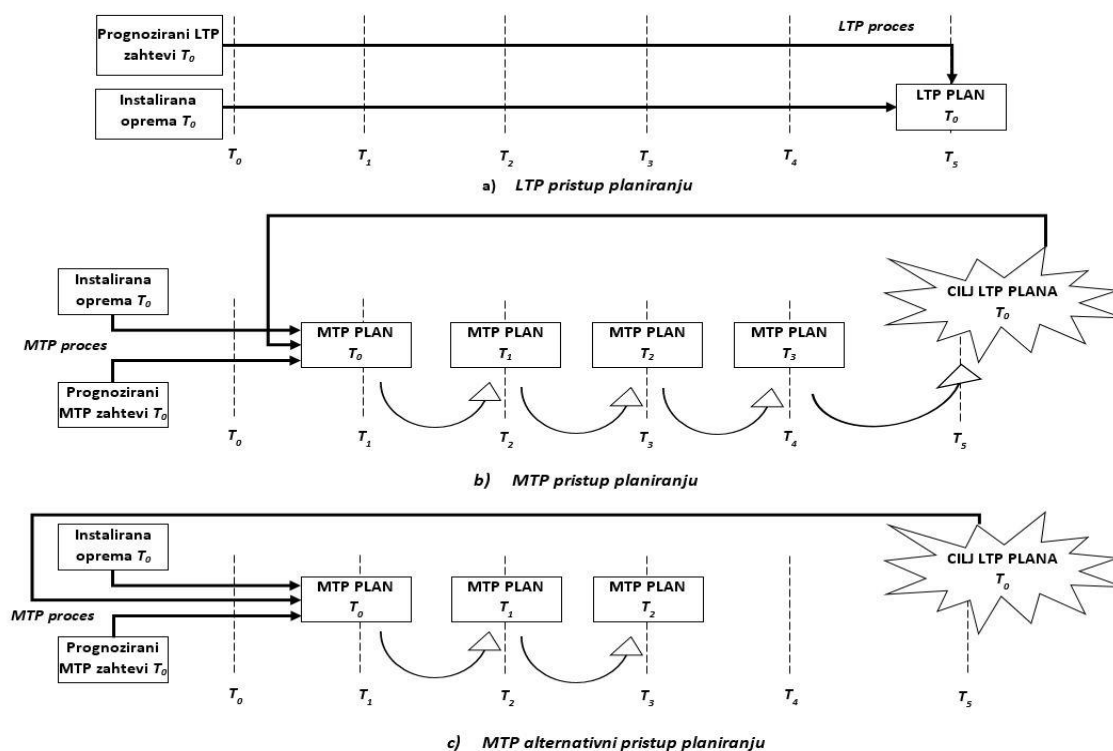
Za realizaciju aktivnosti, koje pripadaju srednjoročnom planiranju, koriste se sledeće vrste ulaznih podataka [26]:

- topologija mreže definisana u okviru dugoročnog plana,
- telekomunikacioni sistemi prenosa u eksploataciji,
- postojeća oprema u čvorovima,
- prognozirana tražnja za svaki period planiranja,
- troškovi elemenata mreže, pri čemu se u obzir uzimaju troškovi instalacije, nadgradnje i deinstalacije postojećih i alternativnih sistema.

Za razliku od procedura vezanih za dugoročno planiranje, aktivnosti vezane za srednjoročno planiranje uključuju diskontovane troškove opreme i to za svaki pojedinačni period koji pripada razmatranom vremenskom intervalu [26]. Ova razlika dovodi do promene optimizacionih kriterijuma, koji se pojavljuju u modelima koji se mogu primenjivati za formiranje srednjoročnih planova. Na ovaj način, ograničenje budžeta, koje se odnosi na troškove zamene ili nadgradnje opreme, implicitno utiče na uvođenje principa odlaganja instalacije ili nadgradnje postojećih elemenata mreže u prihvatljivom vremenskom periodu [1].

Vremenska skala, koja se odnosi na srednjoročno planiranje, formira se u odgovarajućem odnosu prema vremenskoj skali, koja važi za korespondentne dugoročne planove. Navedeni odnos se dobija podelom vremenske skale za dugoročne planove na više odgovarajućih jediničnih perioda (na primer, na svaku kalendarsku godinu) [25], [26]. Odnos aktivnosti koje se primenjuju u okviru srednjoročnih i dugoročnih procesa planiranja, u formatu vremenskih skala, prikazan je na Slici 8. ITU u svojim dokumentima definiše odnos između aktivnosti na formiranju srednjoročnih i dugoročnih planova kroz nekoliko koraka [26]: Slika 8

1. U prvom koraku sprovodi se proces definisanja mreže na dugoročnom nivou, na osnovu prognozirane tražnje za posmatrani vremenski interval (Slika 8a). Dugoročni plan uključuje i postojeću infrastrukturu sa zadatkom dostizanja LTP ciljeva.
2. U drugom koraku sprovode se aktivnosti vezane za proces planiranja na srednjoročnom nivou, sa ciljem da se primenom odgovarajućih proračuna dostignu karakteristike definisane LTP ciljevima (Slika 8b). U ovom koraku se koriste prognozirane vrednosti zahteva na nivou perioda (dobijenih podelom dugoročnog vremenskog intervala). Kao osnova za sprovođenje procesa koristi se stanje postojeće infrastrukture i dugoročni plan (formiran u prvom koraku).



Slika 8. Odnos aktivnosti koje se primenjuju u okviru srednjoročnih i dugoročnih procesa planiranja [26]

U slučaju velikih varijacija, koje se odnose na prognozirane vrednosti nivoa zahteva na srednjoročnom nivou, potrebno je iterativno ponoviti postupke formiranja srednjoročnih planova za korespondentne periode, radi usklađivanja planova sa uočenim promenama. Dodatno, u slučaju da su navedene varijacije izuzetno velike, potrebno je izmeniti i dugoročne planove za posmatrane vremenske periode (Slika 8c). U ovom slučaju može doći i do izmena ciljeva na dugoročnom nivou (LTP ciljeva). Ovaj proces je poznat i pod nazivom *proces pokretnih meta*. U specijalnim slučajevima, kada postoji ekstremno velika neizvesnost, može doći do takvih odstupanja da se uopšte ne može garantovati dostizanje LTP ciljeva. Tada se, po pravilu, odustaje od njihove realizacije, pri čemu se LTP ciljevi usvajaju kao dugoročne planske smernice kojima bi trebalo težiti. U posmatranom scenariju, srednjoročne planove treba prilagoditi, na takav način, da postoji prihvatljiv nivo odstupanja u odnosu na dugoročne planove. U tom slučaju se razmatraju samo one grupe ograničenja, koje se smatraju vrednim za ostvarenje dugoročnih ciljeva [25].

Do primene ovakvog načina planiranja može doći u sledećim situacijama [26]:

- kada mrežni operator smatra da planiranje namenjeno dužim vremenskim intervalima neće proizvesti koristan efekat, jer prognozirane vrednosti nisu pouzdane (što može dovesti do nepouzdanih rezultata).
- kada ograničenja u pogledu planiranog proširenja kapaciteta resursa mreže u veoma dugom periodu ne dovode do optimalne eksploatacije, čak i u slučaju kada se koriste najbolje metode za srednjoročno planiranje.

U ovim slučajevima preporučljiva je primena tzv. „*Breakdown*“ pristupa, gde se kompleksni planski zadaci dele na setove manjih zadataka. Ovakav pristup smatra se kao veoma efektivan [25], [26], o čemu će više biti reči poglavlju 2.2.

### 2.1.3 Kratkoročno planiranje

Kratkoročno planiranje (*short-term planning*, STP) predstavlja grupu planskih aktivnosti, čiji je cilj zadovoljenje identifikovanih nivoa saobraćajnih zahteva u svakom trenutku koji pripada vremenskom intervalu za koji je formiran kratkoročni plan. Pored navedenog, zadatak kratkoročnih planskih aktivnosti je i dostizanje onih ciljeva, koji su definisani u okviru korespondentnog srednjoročnog plana. Za razliku od dugoročnih i srednjoročnih planskih aktivnosti, kratkoročno planiranje se realizuje sa najvišim nivoom detalja i u skladu sa definisanim vremenskim rasporedom, imajući u vidu činjenicu da, u ovom slučaju, nema prisustva neizvesnosti, ili se ono javlja u zanemarljivoj meri (u vanrednim okolnostima). Shodno navedenom, kratkoročni planovi, po pravilu, sadrže:

- detaljan pregled mrežnih lokacija, koje su predmet planiranja,
- detaljan pregled zahteva korisnika, na posmatranim mrežnim lokacijama,
- pregled opreme, koju treba instalirati na posmatranim mrežnim lokacijama,
- detaljan opis servisa i aktivnosti koje se odnose na njihovu realizaciju,
- detaljan pregled troškova opreme, kao i troškova vezanih za realizaciju posmatranih servisa,
- detaljan opis svih ostalih mera, kojima se dostižu ciljevi zacrtani korespondentom MTP strategijom.



Kratkoročne planske aktivnosti su ograničene na upotrebu već instaliranih kapaciteta, bez dodatnih kapitalnih ulaganja u mrežu, odnosno, sprovode se u skladu sa budžetom, definisanim u okviru korespondentne MTP strategije.

## **2.2 „Breakdown“ pristup za rešavanje problema na nivou srednjoročnog i dugoročnog planiranja**

Kao što je navedeno, osnovu „breakdown“ pristupa u rešavanju kompleksnih problema planiranja na srednjoročnom i dugoročnom nivou, čini deljenje na grupe zadataka, koji su jednostavniji za rešavanje.

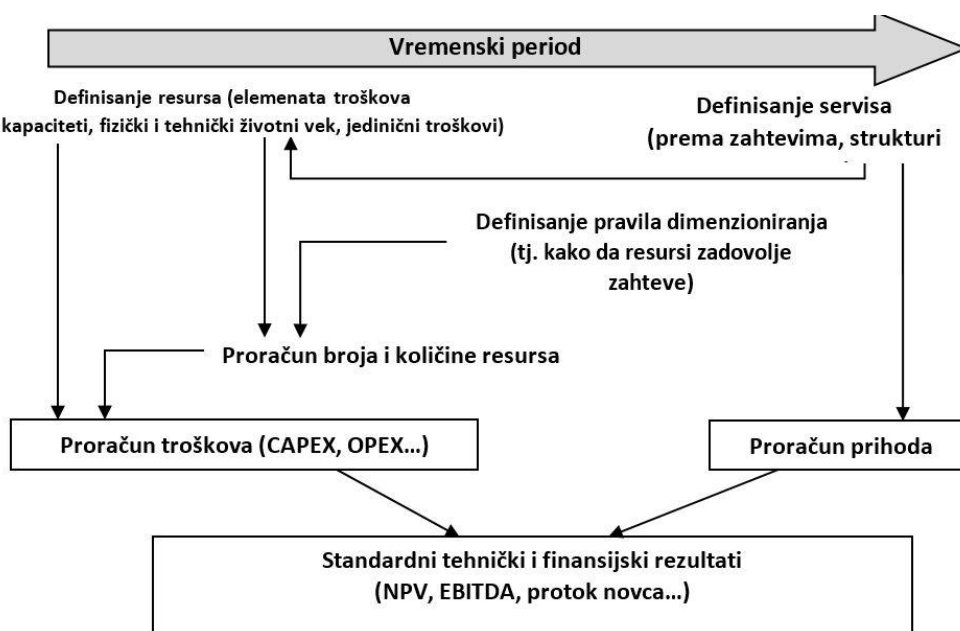
### **2.2.1 „Breakdown“ pristup za nivo rešavanja zadataka na dugoročnom nivou**

S obzirom da proces dugoročnog planiranja zahteva rešavanje veoma kompleksnih i obimnih zadataka, tzv. „razbijanje“ navedenih problema na manje i lakše rešive zadatke predstavlja osnovu navedenog pristupa [25], [26]. Ovaj pristup dovodi do mogućnosti primene jednostavnijih algoritama, kojima se mogu brže rešavati zadaci. Najveći nedostatak ovog pristupa je scenario u kome se glavni problem razbija na preveliki broj manjih problema, što može dovesti do poteškoća u dostizanju postavljenih ciljeva, usled nedovoljne harmonizacije formiranih grupa zadataka, pogotovo u slučajevima, kada rešenje jednog zadatka, treba da bude upotrebljeno kao ulazni parametar za drugi zadatak [26]. Ovo ukazuje i na potrebu za pravilnom identifikacijom podproblema, kao i pripadajućih zadataka. Bez obzira na navedeni nedostatak, upotreba ovog pristupa je pogodna, uzevši u obzir navedenu kompleksnost postavljenih zadataka.

### **2.2.2 „Breakdown“ pristup za nivo rešavanja zadataka na srednjoročnom nivou**

Kompleksnost zadataka, koji se rešavaju na nivou aktivnosti vezanih za proces srednjoročnog planiranja smatra se većom, u poređenju sa dugoročnim planiranjem [25], [26]. S obzirom da je osnovni zadatak srednjoročnog planiranja proširenje kapaciteta resursa mreže, formulacije navedenih zadataka se odnose na maksimiziranje nivoa iskorišćenja resursa uz minimiziranje troškova. U ovakvim vrstama problema, figuriše veliki broj parametara, vezanih za dimenzionisanje resursa mreže. Imajući u vidu i prisustvo drugih aspekata, navedeni zadaci rešavaju se kroz podelu vremenske

skale na tzv. vremenske slotove [25], [26]. U svakom vremenskom slotu, formiraju se saobraćajne matrice, kao i dodatna ograničenja vezana za cenu opreme i ostale korespondentne troškove [33]. Odluke donete kao rezultat srednjoročnog planiranja (na godišnjem nivou) utiču na profitabilnost posmatrane mreže u budućnosti (Slika 9), kao i na mogućnost dostizanja ciljeva zacrtanih u okviru korespondentne LTP strategije [34].

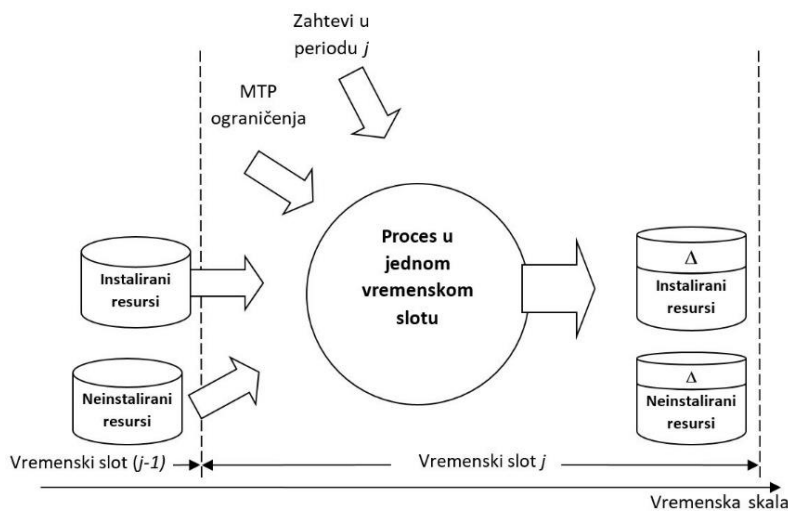


Slika 9. Uticaj srednjoročnih odluka na profitabilnost i troškove [34]

To se posebno odnosi na odluke vezane za nadgradnju ili zamenu postojećih tehnologija. Opcija implementacije nove tehnologije (kako na troškovnoj, tako i na prihodnoj strani), podrazumeva donošenje odluka, koje se odnose na izbor zamenske tehnologije, zatim na izbor optimalnog momenta (ili momenata) u kome se zamena sprovodi, kao i odluke, koja se odnosi na izbor scenarija u kome se zamena posmatranih tehnologija realizuje parcijalno ili kompletno na nivou posmatrane mreže [25], [26]. Navedeni problemi se, u okviru aktivnosti vezanih za srednjoročno planiranje, ponovnim uvođenjem „Breakdown“ pristupa, mogu superponirati na probleme koji se rešavaju u okviru jednog ili više vremenskih slotova [25]:

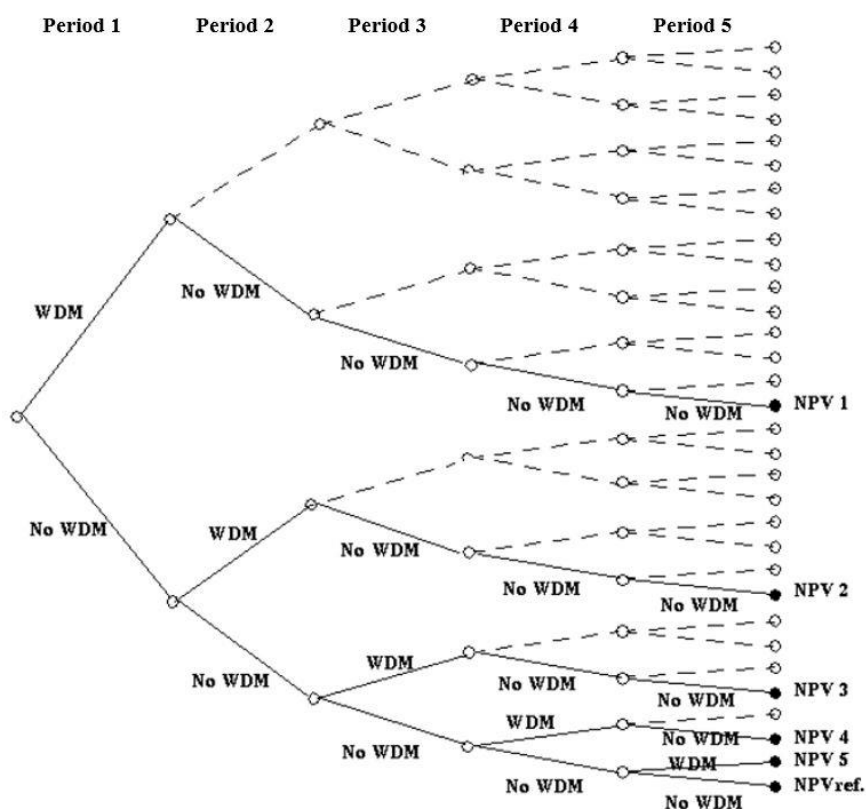
- problemi planiranja na nivou jednog vremenskog slota treba da se definišu tako da se zadovolje ciljevi kojima se zadovoljava porast nivoa zahteva na nivou jednog vremenskog slotu. Posmatrani problemi mogu se podeliti na podprobleme, koji se mogu rešavati na istim principima, koji važe za slučaj

„Breakdown“ pristupa za nivo rešavanja zadataka na dugoročnom nivou, s tim da je kompleksnost rešavanja veća, imajući u vidu veći broj ograničenja i veću preciznost izlaznih rezultata (Slika 10), [26];



Slika 10. Srednjoročno planiranje na nivou jednog vremenskog slota [26]

- navedene podprobleme treba revidirati za svaki posmatrani vremenski slot, što uključuje analizu troškova implementacije nove tehnologije, kao i troškova deinstalacije stare opreme, uz prisustvo opcija mogućih odlaganja uzimajući u obzir diskontovanje cena. Ovakav vid pristupa naziva se „proces odlučivanja“, jer se odluke donose kao rezultat vrednovanja različitih alternativa na odluke, kao i na rešenje u celini. Broj alternativa utiče na tzv. stablo odlučivanja (Slika 11), tako da je za potrebe smanjenja kompleksnosti problema bitno uzeti u razmatranje i tehnike za redukciju stabla odlučivanja, koje se odnose na izmenu tehno-ekonomskih ograničenja, kao i revidiranje razmatranog broja vremenskih slotova [26].



Slika 11. Stablo odlučivanja [26]

Uvođenje „Breakdown“ pristupa, po pravilu, vodi do optimalnog rešenja MTP plana posmatrane mreže. U skladu sa navedenim, moguće je zadati sledeća tri cilja optimizacije [25], [26]:

1. optimizacija troškova mreže u svakom vremenskom periodu;
2. optimizacija diskontovanih troškova ukupne sume investicionih troškova u posmatranom vremenskom periodu;
3. optimizacija planova za naredni srednjoročni period, uzimajući u obzir isključivo dugoročni oblik mrežne arhitekture i/ili strukture kao vid ograničenja koje je podložno određenom stepenu promena.

Bez obzira koji je od navedenih ciljeva optimizacije odabran u procesu srednjoročnog planiranja, u svakom posmatranom vremenskom periodu treba uzeti u razmatranje sledeće vrste troškova mreže [25], [26]:

- troškove nabavke i instalacije opreme u posmatranom vremenu;

- troškove održavanja posmatranih resursa mreže koji se već nalaze u fazi eksploatacije;
- operativne troškove eksploatacije mreže u posmatranom vremenskom periodu;
- uštedu po osnovu otpisa/odlaganja zastarele opreme koja nije upotrebljena do posmatranog vremenskog perioda;
- uštedu po osnovu otpisa/odlaganja zastarele opreme koja je upotrebljena u eksploataciji posmatrane mreže.

Tokom procesa planiranja na nivou jednog vremenskog perioda treba imati u vidu sledeće činjenice [25]:

- u upotrebi je instalirana ali neotplaćena oprema, koju treba koristiti u periodu eksploatacije;
- na raspolaganju je ograničen budžet, tako da je neophodno uspostavljanje prioriteta;
- problemi u usklađivanju razmatranog srednjoročnog plana sa odgovarajućim dugoročnim planom;
- uspostavljanje kriterijuma za definiciju jedne ili više podmreža.

U slučaju planiranja na nivou više vremenskih perioda potrebno je [25], [26]:

- definisati privremeni tok troškova, vezanih za posmatrane resurse mreže;
- uključiti visok nivo neizvesnosti u prognozi tražnje;
- razmotriti zamenu tehnologija na nivou podmreže ili cele mreže;
- rešavati problem planiranja na nivou svakog pojedinačnog vremenskog perioda;
- razmotriti investicije upotrebom *Net Present Value* (NPV) kriterijuma u okviru tehno-ekonomske analize.

### **2.3 Problem usklađivanja kratkoročnih, srednjoročnih i dugoročnih planova**

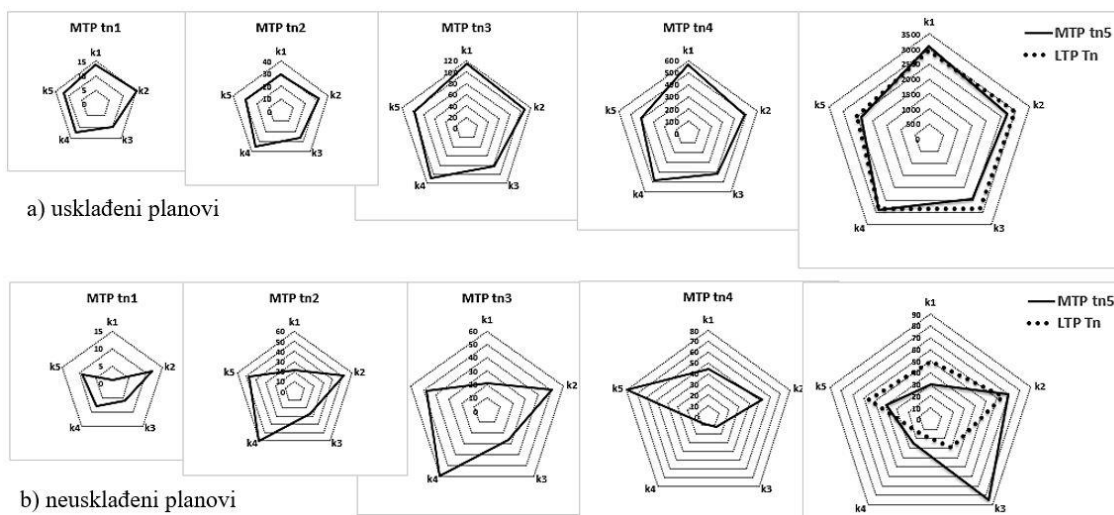
Optimalna metodologija planiranja podrazumeva da kombinovanje kratkoročnih (STP), srednjoročnih (MTP) i dugoročnih (LTP) planova omogućava potpuno

definisane razvoja jedne mreže. Drugim rečima, ovo podrazumeva translaciju LTP plana u vremenu na MTP odnosno STP planove. Nadalje, ovo podrazumeva da svaki srednjoročni plan, koji uključuje proširenje resursa mreže, na takav način da kratkoročni planovi, u svakom trenutku mogu da zadovolje identifikovane nivoe saobraćajnih zahteva. Nažalost, ova usklađenost planova nije česta u praktičnim situacijama [26].

### 2.3.1 Uzroci neusklađenosti u planiranju

Jedan od osnovnih uzroka neusklađenosti srednjoročnih i dugoročnih planova najčešće je prisustvo neizvesnosti u prognozi zahteva. Pored navedenog, prisustvo neizvesnosti često se pojavljuje i u procenama cena opreme, odnosno troškova koji se odnose na nabavku i implementaciju nove tehnologije i novih servisa sa sve većim zahtevima u pogledu propusnog opsega. Samim tim može doći i do promene različitih ograničenja vezanih za budžet namenjen izgradnji mreže, što utiče na vremensko odlaganje proširenja određenih resursa mreže predviđenih u okviru MTP.

Imajući navedeno u vidu, u realnosti se često pojavljuje scenario (na MTP nivou planiranje mreže), gde operatori, svesni činjenice da prognoza na kratkoročnoj osnovi daje tačnije rezultate, smatraju da vredi realizovati samo one srednjoročne planove koji su vezani za jedan i to najbliži vremenski period. Pošto ovakav način realizacije, najčešće i vremenski odudara od zacrtane dinamike planiranja (Slika 12), navedeni scenario na posredan način vodi ka pojavi još jednog uzroka neusklađenosti, odnosno do desinhronizacije vremenskih intervala neophodnih za realizaciju planova na različitim nivoima. Ovakav stav prema realizaciji MTP planova vodi ka scenariju u kome zacrtani ciljevi razvoja mreže na LTP nivou najverovatnije neće biti dostignuti, dok sa druge strane, promena planova utiče na nivo iskorišćenosti resursa mreže, a time indirektno i na pojavu degradacije opsluživanja zahteva korisnika [26].



Slika 12. Primer usklađenosti (a) i neusklađenosti (b) srednjoročnih planova u odnosu na cilj, postavljen dugoročnim planom

Neusklađenost između srednjoročnih i dugoročnih planova, može se pojaviti i usled primene drugačijih kriterijuma optimizacije. Kada se optimizacija sprovodi iterativno (po MTP vremenskim slotovima), izbor kriterijuma (odnosno, ograničenja) po svakoj iteraciji, može u konačnom rezultatu, uticati na mogućnost dostizanja korespondentnog LTP cilja. Drugim rečima, razlike u strukturi kriterijuma mogu dovesti do inkoherenosti srednjoročnih i dugoročnih planova, odnosno do pojave razlika između idealnog i realnog scenarija.

Osim navedenih uzroka, na neusklađenost LTP, MTP i STP planova utiču i razlike u pravilima iskorišćenja resursa. U ovom slučaju se može posmatrati tzv. *time-to-market* karakteristika, koja predstavlja sposobnost mreže, da, u *time-to-market*<sup>5</sup> vremenu, zadovolji odgovarajuće nivoe zahteva na posmatranom tržištu, a da se pri tom ne desi nedostatak posmatranih mrežnih resursa. Ova karakteristika se, u slučaju kratkoročnog planiranja, (kada na raspolaganju već postoje odgovarajući resursi), može dostići povećanjem efikasnosti (i jednostavnosti) upravljanja mrežom. Ipak, u slučajevima srednjoročnog i dugoročnog planiranja, postoje značajne razlike u pravilima iskorišćenja resursa, zbog veće kompleksnosti upravljanja posmatranom

<sup>5</sup> Iako ne postoji jedinstvena definicija, "time-to-market" vreme se obično definiše kao vremenski interval od trenutka pojave zahteva (kojeg treba zadovoljiti) na tržištu, do trenutka kada je posmatrani zahtev zadovoljen.

mrežom, pa je ova vrsta neusklađenosti uglavnom neizbežna, jer se srednjoročno i dugoročno planiranje zasniva na analizi trendova tražnje [26].

Tabela 1 daje kratak pregled uzroka neusaglašenosti, sa naznačenim uticajem na vremenski aspekt planiranja [26]:

*Tabela 1. Pregled uzroka neusklađenosti [26]*

<b>Uzrok neusklađenosti</b>	<b>Afektirani planovi</b>
Visoka neizvesnost	LTP – MTP i MTP – STP
Ograničenja u budžetu	LTP – MTP
Razlike u kriterijumima optimizacije	LTP – MTP
Razlike u pravilima iskorišćenja resursa	LTP – MTP i MTP – STP

Neusklađenost se može suzbiti primenom odgovarajućih mera, što će biti prikazano u narednom odeljku.

### **2.3.2 Mere za suzbijanje efekta neusklađenosti**

Merama protiv neusklađenosti na kratkoročnom nivou, eliminiše se nedostatak resursa, kao i dostizanje skraćanja vremena *time-to-market*, u kome se svi servisi mogu implementirati i ponuditi korisnicima u posmatranoj mreži, čim se pojave. Da bi se ostvario navedeni cilj, problem neusklađenosti treba rešavati prema uzroku, koji se identifikuje u konkretnom slučaju. U protivnom, pojava neusklađenosti može voditi ka pojavi zagušenja u mreži odnosno gubitku saobraćaja ili degradaciji kvaliteta opsluživanja korisnika, što rezultira snižavanju profita operatora mreže. Da bi se efekat neusklađenosti suzbio, preporučuju se preventivne i reaktivne mere [26], čiji je pregled, u sažetom obliku predstavljen u Tabeli 2. Tabela 2

Preventivne mere deluju na uzroke neusklađenosti radi suzbijanja njenih efekata. Opšti oblik preventivnih mera sastoji se u poboljšanju procesa planiranja, što uključuje izmenu parametara ili metoda za prognoziranje [35], sa ciljem pouzdanog sagledavanja budućih zahteva korisnika, kao i uspostavljanja jasnih relacija između različitih faza u procesu planiranja.



Tabela 2. Pregled mera za suzbijanje neusklađenosti [26]

Preventivne mere	
Uzrok neusklađenosti	Mere
Visoka neizvesnost	Izmena parametara ili metoda za prognoziranje
	Skraćivanje horizonta planiranja
Ograničenja u budžetu	Unapređenje procesa formiranja mreže
	Mere rekonfiguracije mreže za preraspodelu prognoziranog nivoa saobraćajnih zahteva
Razlike u kriterijumima optimizacije	/
Razlike u pravilima iskorišćenja resursa	Unapređenje procesa formiranja mreže
	Skraćivanje horizonta planiranja
	Mere rekonfiguracije mreže za preraspodelu prognoziranog nivoa saobraćajnih zahteva
	Izbor jednostavnije mrežne arhitekture ili pojedinih elemenata mreže
Reaktivne mere	
Uzrok neusklađenosti	Mere
Visoka neizvesnost	Analiza rizika
Ograničenja u budžetu	/
Razlike u kriterijumima optimizacije	/
Razlike u pravilima iskorišćenja resursa	Primena „dinamičnih tehnika“

U navedenom kontekstu mogu se uključiti i dodatne mere, poput skraćivanja horizonta planiranja, sa ciljem snižavanja nivoa neizvesnosti. Takođe, u određenim slučajevima treba razmatrati jednostavnije oblike mrežnih arhitektura, kao i pripadajućih elemenata mreže, kojima se dodatno mogu usaglasiti planovi na kratkoročnom i srednjoročnom nivou. Na primer, izmenom planirane strukture

protokola rutiranja, može se uticati na preraspodelu prognoziranog nivoa saobraćajnih zahteva, bez troškova vezanih za izgradnju dodatne infrastrukture [26].

Treba imati u vidu da primenom preventivnih mera nije moguće potpuno eliminisati neusklađenost. Nasuprot tome, prihvatanje uočene neusklađenosti, uz pokušaj kvantifikacije njenih efekata na rezultate planiranja, predstavlja osnovu reaktivnog pristupa, koji uključuje analizu rizika, kao i primenu tzv. „dinamičkih tehnika“. Analiza rizika odnosi se na probleme sa neizvesnošću prognoziranja tražnje određenih servisa, kao i korespondentne probleme vezane za opremu, neophodnu za proširivanje kapaciteta (posmatrano sa aspekta troškova i funkcionalnosti) bez zanemarivanja drugih aspekata vezanih za regulaciju tržišta, pitanja konkurencije i druge tehno-ekonomske karakteristike<sup>6</sup>. Primena tzv. „dinamičkih tehnika“ podrazumeva upotrebu određenih pragmatičnih rešenja, kao alternativni rešenjima dobijenim odgovarajućim tehnikama optimizacije (kojima je teže rešiti određene probleme neusklađenosti usled prisustva različitih pravila iskorišćenja resursa na kratkoročnom, srednjoročnom i dugoročnom nivou) [26].

U ovoj disertaciji, prepoznat je problem i značaj neusklađenosti planova u različitim vremenskim okvirima, kao i problem neizvesnosti na MTP i LTP nivou. U poglavlju 4.1.4.6, predložen je pristup, u kome se, uvođenjem novog parametra, smanjuje neizvesnost, u okviru mera za preventivno suzbijanje neusklađenosti.

## **2.4 Klasifikacija planskih aktivnosti prema slojevima mreže**

Kompleksnost telekomunikacionih mreža, koje su predmet planiranja, ogleda se u implementaciji različitih arhitektura i primenjenih tehnologija. Shodno navedenom, planske aktivnosti na nivou celokupne mreže mogu se klasifikovati prema slojevima mreže, segmentima mreže (odnosno podmrežama), kao i primenjenim tehnologijama [4], [25], [36].

---

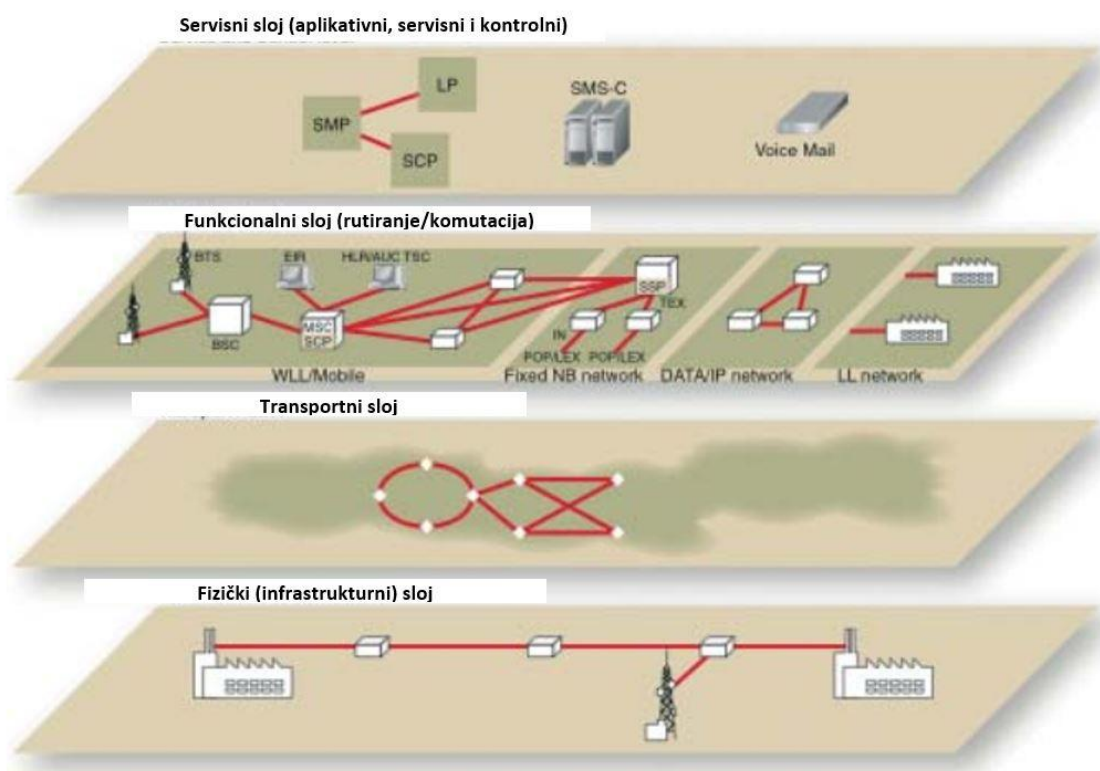
<sup>6</sup> Poglavlje 5.3.

Struktura slojeva, posmatrano sa stanovišta planskih aktivnosti, definiše se po vertikali u tzv. „klijent-server“ odnosu. Prema [4], [25], [36], definisana su 4 sloja (Slika 13):

- fizički (infrastrukturni),
- transportni,
- funkcionalni (rutiranje/komutacija) i
- servisni sloj (aplikativni, servisni i kontrolni).

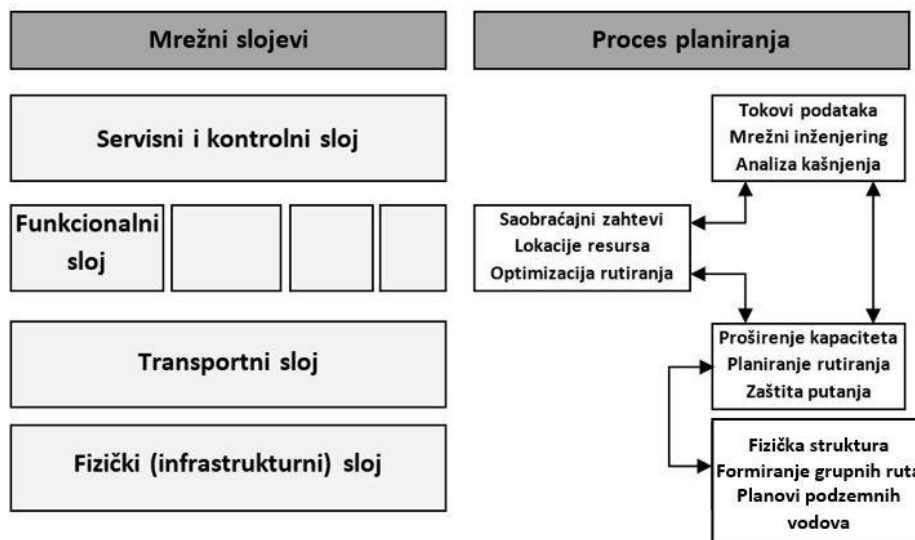
Struktura planskih aktivnosti celokupne mreže prema segmentima podrazumeva podelu komunikacija "s kraja na kraj" na podpodručja do nivoa kućne mreže, pristupne, regionalne i ivične mreže.

Takođe, razlikuje se struktura planskih aktivnosti na osnovu primenjene tehnologije poput: FO, WDM, PDH, SDH, PSTN, ATM, IP, NGN, FN, GSM, 3G, 4G, itd.



Slika 13. Podela planskih aktivnosti, prema strukturi slojeva [4], [25], [36]

Imajući u vidu klasifikaciju aktivnosti prema navedenim slojevima, u [4], [25], [36], predložena je podela procesa planiranja u četiri faze (Slika 14), gde se rezultati dobijeni na kraju jedne faze koriste kao ulazni podaci u narednoj fazi:



Slika 14. Faze procesa planiranja prema slojevima mreže [4], [25]

1. prva faza procesa planiranja uključuje prognoziranje zahteva od tačke do tačke, kao i aktivnosti planiranja vezane za dizajn funkcionalnog sloja, koje se odnose na probleme rutiranja, komutacije, primene mobilnih i drugih tehnologija, itd;
2. druga faza se odnosi na planiranje i dizajn sistema prenosa podataka, što uključuje probleme agregacije saobraćaja, optimizaciju ruta, formiranje redundantnih ruta, i sl. Rezultati, dobijeni kao ishod ove faze koriste se kao ulazne veličine za planske aktivnosti na nivou fizičkog sloja;
3. treća faza uključuje aktivnosti vezane za planiranje i dizajn fizičke infrastrukture;
4. četvrta faza vezana je za servisni sloj, gde se planske aktivnosti odnose na analize mrežnog saobraćaja, dimenzionisanje kapaciteta planiranih linkova, itd.

Imajući u vidu kompleksnost infrastrukture mreže, neophodna je iterativna primena aktivnosti, klasifikovanih prema fazama, u cilju usaglašavanja dobijenih planova.

### 3 PROGNOZIRANJE TRAZNJE ZA TELEKOMUNIKACIONIM SERVISIMA

Savremene telekomunikacije karakteriše izuzetna ekspanzivnost u pogledu broja korisnika, obima i vrsta servisa/proizvoda koje nude. Stalne i brze promene u ovoj oblasti rezultat su tehničko-tehnološkog usavršavanja mrežne opreme, što rezultira time da se na tržištu permanentno nudi veliki broj novih servisa/proizvoda. Takođe, povećavaju se i zahtevi tržišta po pitanju *QoS* [37].

Povećanje stepena zasićenosti telekomunikacionog tržišta za operatore i servis provajdere uglavnom znači smanjenje prihoda. Pod takvim pritiskom oni ne samo da imaju problem održanja postojećih, već moraju da traže načine za novim izvorima prihoda. Da bi umanjili odliv korisnika, operatori su prinuđeni da snižavaju cene svojih servisa. Ovo samo po sebi znači i manji prihod, ali se razlika može nadoknaditi upravo ponudom novih servisa i/ili servisa dodatne vrednosti (*value-added services*). Ovde se kao problem može pojaviti spremnost korisnika da prihvate nove ponuđene servise. S obzirom da razvoj novih telekomunikacionih servisa/proizvoda zahteva značajna materijalna ulaganja, neophodno je da se pri planiranju novog servisa/proizvoda posveti velika pažnja prognoziranju ponašanja tržišta u odnosu na novi ponuđeni servis/proizvod [37].

Planiranje poslovanja u sektoru telekomunikacija zahteva veliki broj tehničkih i komercijalnih odluka, koje zavise isključivo od poznavanja broja potencijalnih korisnika i moguće tražnje. Postoje tri velike grupe stručnjaka kojima je prognoza prihvatanja servisa/proizvoda neophodna: inženjerskim timovima za dizajn i implementaciju mreža i servisa, razvojnim i marketinškim timovima, kao i spoljašnjim entitetima (potencijalni investitori, regulatori, proizvođači opreme i dr.) [37].

U tehničkoj oblasti, prognoziranje je potrebno za donošenje odluka oko tehničko-tehnološkog dizajna mreže i dizajna servisa. Kao dodatak pitanjima dizajna, prognoza je potrebna za konfiguraciju i dimenzionisanje resursa mreže [37].

U oblasti marketinga, prognoziranje je potrebno da bi se kvantifikovao segment potencijalnih korisnika i definisala saobraćajna područja koja bi bila prioritet u

uvođenju nekog novog servisa/proizvoda. Pored toga, prognoza je potrebna za definisanje modela prihoda, investiranja, kao i da bi se odredila odgovarajuća politika cena. Za kompanije koje se tek pozicioniraju na telekomunikacionom tržištu, finansiranje može biti nesigurno i mnogo toga može zavistiti od rezultata modela za prognoziranje razvoja tržišta, koji se mogu koristiti kao argumentovano sredstvo ubeđivanja potencijalnih investitora i drugih poslovnih partnera oko realizacije razvojnih projekata [37].

Prognoziranje novih servisa/proizvoda ima, pre svega, strategijski značaj za poslovanje kompanije. Prognoziranje treba da da pouzdanu procenu budućih potreba za komunikacionim pogodnostima. Kao glavni razlozi za prognoziranje novih servisa/proizvoda najčešće se navode [37]:

- izbor odgovarajuće tehnologije i komponenata mreže,
- izbor optimalne topologije i strukture mreže,
- implementacija novih funkcionalnosti mreže,
- uvođenje novih servisa/proizvoda,
- planiranje strategije zamene stare tehnologije novom,
- planiranje i obezbeđenje neophodnih kapaciteta,
- pravovremeno udovoljenje zahtevima korisnika,
- koordinisana proizvodnja terminalne opreme i uređaja,
- obezbeđenje potrebnog broja stručnih kadrova za vršenje odgovarajućih delatnosti i dr.

Izuzetno je važno pravilno spoznati početne zahteve za novim servisima/proizvodima, kako bi se obezbedila visoka pouzdanost i raspoloživost svih resursa mreže, pri najnižoj mogućoj ceni. Mogući saobraćajni gubici će neminovno dovesti i do problema u snabdevanju rezervnom opremom i uređajima, nadogradnji sistema i različitim dodatnim uslugama [37].

U cilju unapređenja metoda prognoziranja novih servisa/proizvoda, odnosno njihovih konačnih rezultata veoma je značajno [37]:

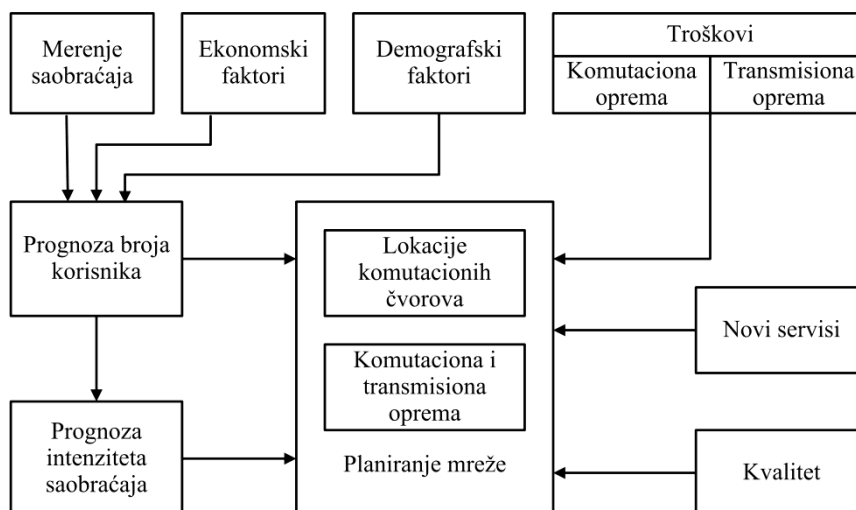
- prikupiti relevantne ulazne podatke (demografske i ekonomske podatke, rezultate merenja intenziteta saobraćaja, analize tržišta, komparativne analize i sl.);
- sistematično koristiti prikupljene podatke i
- koristiti više različitih metoda (kvantitativnih i kvalitativnih) i porediti dobijene rezultate.

Implementacija novih servisa/proizvoda svakako povećava atraktivnost tržišta, ali dovodi i do negativnog uticaja na operativne performanse sistema zbog povećanja sveopšte nesigurnosti sistema. Jedan od načina da se ova nesigurnost svede na najmanju moguću meru, je pouzdana prognoza prihvatanja novih servisa/proizvoda na tržištu. Smatra se da prognoziranje visoko-tehnoloških industrijskih projekata treba realizovati primenom kvalitativnih tehnika prognoziranja sopstvenih eksperata i *brainstorming* tehnika. S druge strane, prognoziranje osnovnih industrijskih projekata se više sprovodi tradicionalnim tehnikama istraživanja tržišta putem intervjua i anketama o namerama korisnika da prihvate novi ponuđeni servis/proizvod [37].

### 3.1 Uloga prognoziranja u procesu planiranja

Planiranje i dizajniranje telekomunikacione mreže je iterativni proces kao što je objašnjeno u drugom poglavlju. Proces planiranja mreže objedinjuje projektovanje topologije mreže i sastavnih elemenata mreže u cilju optimalnog funkcionisanja mreže, tako da se zadovolje zahtevi korisnika i operatora mreže [37]. Prognoziranje saobraćaja, odnosno tražnje za servisima, predstavlja neophodan preduslov za uspešno planiranje i dimenzionisanje neophodnih resursa telekomunikacione mreže.

Pre nego što otpočne proces planiranja mreže, odgovarajući protokoli i tehnologije prenosa moraju biti odabrani. Rezultati procesa prognoziranja broja korisnika i saobraćaja predstavljaju neophodne ulazne parametre za uspešno planiranje resursa komunikacione mreže (Slika 15), [37].

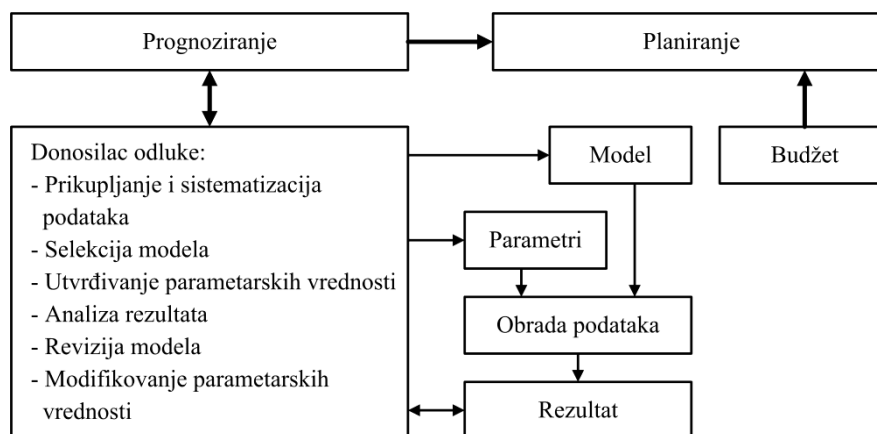


Slika 15. Uloga prognoziranja u procesu planiranja komunikacione mreže [37]

Neophodni ulazni podaci za prognoziranje prikupljaju se iz saobraćajnog područja koje opslužuje posmatrani komutacioni čvor. Merenje saobraćaja podrazumeva svako prikupljanje podataka o saobraćajnom opterećenju elemenata mreže. Merenje treba da karakteriše što manje ulaganje materijalnih sredstava i angažovanja administrativnog i tehničkog osoblja, a ostvarivanje što veće koristi od dobijenih podataka. Adekvatno planiranje mreže omogućava poboljšanje funkcionisanja celokupne mreže, poboljšanje kvaliteta servisa kao i pravovremeno uvođenje novih servisa, što opravdava troškove prikupljanja i analiziranja saobraćajnih podataka. Neophodni ulazni podaci korelacionih metoda prognoziranja broja korisnika vezani su za ekonomski status pojedinaca ili porodice, gde se kao osnovna promenljiva uzima nacionalni dohodak po glavi stanovnika. Pored toga, demografski podaci koji se pre svega odnose na starosnu strukturu stanovništva i natalitet mogu biti od velike koristi [37].

Usklađenost sa vremenom svake aktivnosti je ovde od prevashodnog značaja. Postoji dugoročno, srednjoročno i kratkoročno prognoziranje odnosno planiranje, od kojih svako ima svoje sopstvene zahteve koji se tiču detaljnosti planiranja. Svaki vid planiranja mora koristiti manje ili više detaljnu prognozu zahtevanih veličina (Slika 16). Vremenski domen prognoze se direktno odražava i na izbor odgovarajuće metode prognoziranja [38].





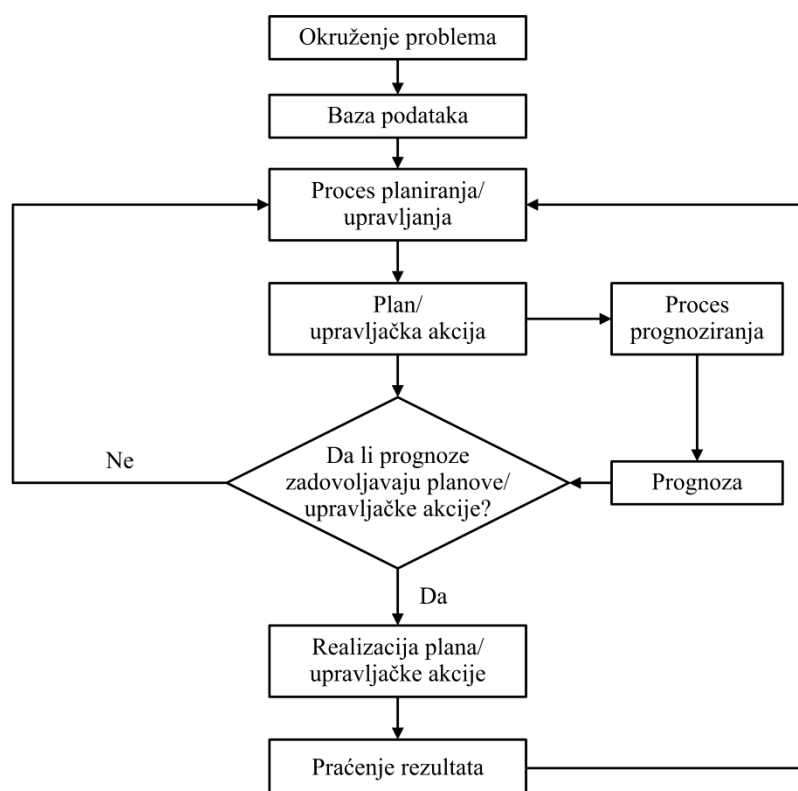
Slika 16. Povezanost procesa prognoziranja i planiranja [37]

Plan predstavlja predlog za preduzimanje odgovarajućih aktivnosti kao i procena troškova koje sprovođenje plana podrazumeva. On može uključiti alternativne pravce u preduzimanju određenih aktivnosti. Planovi se razmatraju od strane direkcija koje sačinjavaju timovi menadžera, na osnovu kojih se donose odluke. Prema odlukama se formuliše program rada. On zahteva detaljno planiranje onoga što treba da se uradi kako bi sva raspoloživa oprema postala operativna. Obzirom da se program rada i investicije baziraju na rezultatima prognoziranja, veoma je važno da oni budu što je moguće tačniji. Takođe je neophodno definisati stepen neizvesnosti kako bi planer znao kada i u kojoj meri može da bude fleksibilan u odlučivanju [37].

U mnogim razvijenim zemljama postoji situacija da je tražnja daleko veća od zadovoljavanja iste. U takvim slučajevima praktično se sva proširenja kapaciteta iskoriste odmah bez bitnog smanjenja "pukotine" između ponude i tražnje. Pored toga, veoma je teško prognozirati stvarnu tražnju, pošto se postojeća tražnja ne može lako meriti ili proceniti. Statistički podaci koji se mogu pribaviti uglavnom se odnose na demografske podatke, postojeći broj korisnika određenih servisa i opsluženi saobraćaj. Zadatak prognozera je da proceni stvarnu tražnju pravilnom korekcijom prikupljenih podataka, tako da će donosilac odluke znati efekte na odnos ponude i tražnje. U ovakvoj situaciji značajno je i pitanje politike same administracije u smislu vođenja odgovarajuće tarifne politike, promotivnih kampanja, davanja prioriteta pojedinim korisnicima, razvoju usluga i slično [37].

Različiti vidovi prognoziranja i planiranja obuhvataju različite elemente mreže, u zavisnosti od posmatrane konfiguracije mreže. Kratkoročna prognoza treba da bude

detaljna, jer koristi kratkoročnom planiranju u kojem svaki detalj plana treba da bude pažljivo razrađen. Dugoročna prognoza je strateškog karaktera i predstavlja obvojnica za sve kratkoročne planove. Manje je precizna i ima širi interval poverenja. Ako rezultati prognoziranja nisu zadovoljavajući, plan ili upravljačka akcija se revidiraju. Ovaj proces se ponavlja sve dok rezultati ne budu zadovoljavajući, i tada se revidirani planovi ili upravljačke akcije primenjuju, a potom dobijeni rezultati koriste za planiranje i upravljanje u narednom periodu, što je ilustrovano na Slici 17, [37].



Slika 17. Algoritam korekcije plana ili upravljačke akcije u zavisnosti od rezultata prognoziranja [37]

Može se zaključiti da je neopravdano praviti i realizovati planove bez adekvatno sprovedenog procesa prognoziranja, koji upravo treba da obezbedi ulazne veličine za formiranje tih planova, odnosno preduzimanje odgovarajućih upravljačkih akcija [39].

### 3.2 Karakteristike procesa difuzije servisa od interesa za strateško planiranje mreže

U cilju donošenja validnih strateških odluka upravljačkoj strukturi operatora mreže moraju stajati na raspolaganju određeni alati za analizu tražnje. Metode prognoziranja postojećih i novih servisa spadaju u jednu takvu kategoriju alata koji indirektno svoje efekte imaju na donošenje strateških odluka, odnosno direktno na analizu budućih kretanja određenih tržišnih veličina. Za razliku od tradicionalnih metoda prognoziranja koje koriste statističke podatke u cilju predviđanja trenda daljeg kretanja posmatranih veličina, metode prognoziranja tražnje novih servisa/proizvoda raspolazu sa vrlo ograničenim skupom podataka, ili odsustvu istih [40]. Modeli prognoziranja novih servisa prevashodno se koriste kako bi opisali difuziju novog servisa/proizvoda tokom vremena na određenom tržištu, odnosno pružili informacije o budućim kretanjima broja novih korisnika. S tim u vezi, najvažnije informacije koje ovi modeli prognoziranja mogu da pruže su [40]:

- kumulativna funkcija broja novih korisnika;
- funkcija trenutnog broja korisnika tokom vremena;
- brzina sa kojom se dešava prihvatanje novog servisa;
- vreme nakon koga se očekuje ulazak/izlazak iz pojedinih faza životnog ciklusa;
- vreme nakon koga se očekuje maksimalna prodaja (prihvatanje) servisa/proizvoda;
- vremenski interval nakon koga se predviđa pad prodaje;
- vreme dostizanja željenog nivoa dobiti;
- najbolji trenutak za plasman supstitucije - zamenskog servisa/proizvoda;
- efekti primene elemenata marketing miksa;
- efekti promene poslovne strategije;
- vreme nakon koga dalji proces prihvatanja servisa postaje samoodrživ;
- najbolji trenutak za promenu poslovne strategije u cilju dužeg opstanka na tržištu i veće dobiti i dr.

Međutim, strateške odluke se ne mogu donositi isključivo na bazi ovih informacija. Za njihovo donošenje upravljačke strukture operatora moraju [40]:

- razumeti zakonitosti koje prouzrokuju dinamiku rasta broja novih korisnika, odnosno proces difuzije novog servisa/proizvoda.
- razumeti faze životnog ciklusa servisa;
- upoznati tržišne faktore koji pokreću difuziju tzv. pokretače difuzije;
- razumeti efekte koji tržišni faktori imaju na difuzioni proces;
- upoznati kategorizaciju potencijalnih korisnika prema preferentnosti ka novom servisa;
- razumeti šta pokreće potencijalne korisnike u prihvatanju novog servisa/proizvoda;
- razumeti uticaje i ciljeve svake kategorije korisnika na difuzioni proces;
- poznavati strategije u svakoj fazi životnog ciklusa;
- razumeti veličinu i uticaj konkurenata na proces difuzije;
- spoznati udeo svake kategorije potencijalnih korisnika u ukupnom potencijalu tržišta;

Analiziranjem životnog ciklusa servisa, njegovih faza i tranzicionih tačaka, identifikovanjem tržišnih činioca i analizom njihovog uticaja na difuziju novog servisa, mogu se doneti pravovremene i ispravne poslovne odluke odnosno primeniti poslovna strategija koja će dati željene rezultate u cilju pouzdane prognoze tražnje [40].

### **3.3 Životni ciklus novog servisa/proizvoda**

Mnogi autori [41], [42] su kroz svoje radove potvrdili činjenicu da se rast brojnih fenomena može okarakterisati krivom "S" oblika. Tako, na primer, kriva "S" oblika se koristi za aproksimaciju broja budućih kupovina dugoročnih proizvoda, širenje zaraznih bolesti kroz populaciju, prihvatanje inovacije itd [40]. Zahvaljujući, pre svega, *Everet Rogers-u* i *Frank Bass-u* u praksi je potvrđeno da širenje inovacije kroz socijalni sistem takođe formira krivu "S" oblika što je objašnjeno difuzionom teorijom. Difuzija se može definisati kao širenje inovacije kroz socijalni sistem [40].

Razumevanje oblika i zakonitosti koje utiču na formiranje same difuzione krive u mnogome je uticalo na razvoj brojnih modela prognoziranja tražnje i na njihovu uspešnu primenu u praksi. Jedinostveni oblik difuzione krive novog servisa/proizvoda predstavlja najvažniju karakteristiku difuzionog procesa [40].

Difuziju određene inovacije mogu pokrenuti različiti atributi tako da se može govoriti o pokretačima ili inicijatorima difuzije i tu se prvenstveno misli na [40]:

- prihod korisnika,
- promenljive marketing miksa,
- efekat usmenog prenosa iskustava,
- komunikacija,
- ekonomija,
- heterogenost korisnika,
- učenje korisnika i dr. [43]

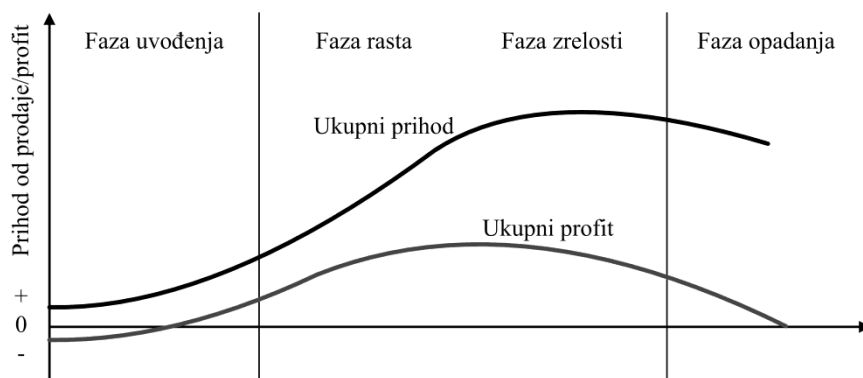
Često se difuzija meri nivoom prodaje. Tu se prevashodno misli na broj prodatih novih proizvoda ili broj novih korisnika ponuđenog servisa u posmatranom trenutku vremena. Razumeti životni ciklus novog servisa/proizvoda odnosno zakonitosti koje ga definišu predstavlja prvi korak ka uspešnom prognoziranju njegove tražnje [40], [43].

Životni ciklus servisa/proizvoda karakterišu različite faze i njima karakteristične tranzicione tačke. Ključne razlike mogu se uočiti prema trajanju, brzini rasta, padu cena u različitim fazama i tranzitnim tačkama životnog ciklusa servisa/proizvoda [40], [43].

Posmatrajući životni ciklus servisa/proizvoda mogu se uočiti četiri osnovne faze [40], (Slika 18):

- faza uvođenja (faza u kojoj se servis/proizvod javlja na tržištu i kada počinje njegova postepena prodaja);
- faza rasta (tržište postaje svesno datog servisa/proizvoda i u ovoj fazi se ostvaruje najbrži rast prodaje);
- faza zrelosti (dolazi do kulminacije prodaje).
- faza opadanja (usled zasićenosti tržišta i pojave novih konkurentskih servisa/proizvoda dolazi do opadanja prodaje).

Može se zaključiti da broj korisnika novog servisa/proizvoda u fazi rasta naglo raste, da bi ovaj intenzitet polako slabio i na kraju opao sa vremenom [40], [44].



Slika 18. Faze životnog ciklusa novog servisa/proizvoda [37]

U zavisnosti od veličine pojedinih kategorija korisnika na specifičnom tržištu, njihove opredeljenosti za prihvatanje novog servisa/proizvoda, načina na koji reaguju na podsticajne faktore (eksterne i interne) zavisice brzina i vreme prihvatanja novog servisa/proizvoda. Zbog toga je neophodno razumeti potencijale korisnike, njihovu reakciju na različite podsticaje, razloge njihovih akcija, motivacione faktore kako bi se mogla primeniti adekvatna strategija u pravo vreme [40].

Ključni pokretači difuzije inovacije sa aspekta kategorije korisnika su inovatori i imitatori. Inovatori predstavljaju kategoriju korisnika koji su više u dodiru sa novim razvojnim segmentima servisa/proizvoda ili tehnologija i koji direktno utiču na imitatore prenoseći im svoja iskustva. Inovatore pokreće želja da probaju novi servis/proizvod a verovatnoća korišćenja novog servisa/proizvoda od strane inovatora ne zavisi od broja drugih korisnika. S druge strane, imitatori su primarno pod uticajem svoga okruženja i upravo je verovatnoća njihovog korišćenja zavisna od broja korisnika koji već koriste posmatrani novi servis/proizvod. Imitatori zapravo i predstavljaju osnovu širenja inovacija (rana i kasno zrela faza) [40]. Upravo faktori inovacije i imitacije oblikuju krivu difuzije. Ova dvo-segmentna struktura sa asimetričnim uticajem dosledna je nekim marketinškim strategijama koje dele dve osnovne pretpostavke: neki korisnici su više u dodiru sa novim dostignućima od drugih a sa druge strane prihvatanje usluga pojedinih korisnika kao i njihova mišljenja imaju disproportionalni uticaj na druge korisnike i na njihovo prihvatanje servisa/proizvoda [40].

*Rogers* (1995), [45] je došao do zaključka da inovatori čine približno 2.5 procenta populacije dok su *Mahajan, Muller i Srivastava* (1990), [46] pomerili gornju granicu za inovatore na 2.8 %. *Rogers*-ova teorija bazira se na činjenici da će se inovacija širiti kroz socijalni sistem prateći krivu S oblika, tako što rani korisnici prvo biraju inovaciju, zatim ih prati većina, sve dok inovacija ne postane uobičajena.

Smatra se da je brzina prihvatanja novog servisa/proizvoda pod uticajem više različitih faktora [47], [48]:

- stepen relativne prednosti servisa/proizvoda u odnosu na postojeće servise/proizvode;
- stepen kompatibilnosti (stepen do koga je novi servis/proizvod kompatibilan sa postojećim operacijama);
- stepen složenosti servisa/proizvoda sa aspekta eksploatacije;
- nivo promocije (stepen dostupnosti novog servisa/proizvoda pre šire eksploatacije) [49], [50].

*Rogers* (2003), [48] definiše brzinu prihvatanja inovacije od strane potencijalnih korisnika kao: “Relativnu brzinu kojom članovi socijalnog sistema prihvataju inovaciju.” Procena brzine prihvatanja inovacije odnosno difuzije novog servisa/proizvoda može sprovedi na osnovu mnogih atributa. *Rogers* smatra da najveći procenat varijacije brzine prihvatanja izazivaju upravo vrsta inovacije, komunikacioni kanali (masmediji ili interpersonalni kanali), socijalni sistemi i uticajne ili javne ličnosti. Za *Rogers*-a, relativna prednost servisa/proizvoda je najjači faktor procene brzine prihvatanja inovacija [40]. Relativna prednost je stepen doživljavanja inovacije kao naprednijeg i kvalitetnijeg rešenja od onog koju zamenjuje. Aspekti inovacija poput cene ili motivacije radi socijalnog statusa su elementi relativne prednosti. Dok su inovatori, rani prihvatoci i rana zrela faza više statusom motivisani za prihvatanje inovacije, kasna zrela faza kao i pratoci prihvataju socijalni status kao manje značajan. Kako bi se povećala brzina prihvatanja inovacije i kako bi relativna prednost bila efikasnija, direktni ili indirektni finansijski uticaj se može koristiti kako bi se potencijalnim korisnicima dao podsticaj u prihvatanju inovacije. Podsticaji su deo faktora podrške i motivacije [40]. Kompatibilnost kao atribut takođe predstavlja još

jedan motivacioni faktor u difuzionom procesu. Kompatibilnost je stepen do koga se inovacija doživljava kao dosledna sa postojećim vrednostima, prošlim iskustvima kao i potrebama potencijalnih korisnika. Ukoliko je inovacija kompatibilna sa potrebama pojedinaca onda će se neizvesnost smanjiti a brzina prihvatanja inovacije porasti. Stepenn složenosti servisa/proizvoda sa aspekta eksploatacije je stepen do koga se inovacija doživljava kao relativno složena za razumevanje i upotrebu. Složenost je, za razliku od drugih atributa, u negativnoj korelaciji sa brzinom prihvatanja. Prevelika složenost inovacije predstavlja veliku prepreku njenom širenju kroz socijalni sistem odnosno njenom prihvatanju. Stepenn probe je stepen do koga se inovacijom može eksperimentisati na ograničenoj osnovi [40]. Što se inovacija više puta proba to je njeno prihvatanje brže. Tokom probe inovacije potencijalni korisnici mogu otkriti pojedine aspekte inovacija koje ranije nisu što može imati pozitivan efekat na proces prihvatanja. Stepenn posmatranja je stepen do koga su rezultati inovacije vidljivi za druge. [40], [51].

Generalno, u oblasti telekomunikacija životni ciklus servisa/proizvoda se skraćuje, delimično zbog brzine uvođenja novih servisa/proizvoda ali i zbog brzog napretka u nauci i tehnologiji. Kompanije sve više zavise od prihoda koje donose novi servisi/proizvodi. Novi servisi/proizvodi omogućavaju kompanijama da povećaju prihode i privuku nove korisnike na postojećim i novim tržištima. Kompanije najčešće uvode novi servis/proizvod kao zamenu, ili poboljšanje postojećeg servisa/proizvoda, koji dostiže kraj životnog ciklusa [37].

Istraživanja pokazuju da će 70% servisa/proizvoda, koji se danas nude, zastareti za šest godina. Sa druge strane, kompanije sa najbržim industrijskim rastom, poput modnih kompanija i visoko-tehnoloških kompanija, zastarevanje svojih servisa/proizvoda mogu očekivati znatno brže, kroz dve ili čak kroz godinu dana. Na telekomunikacionom tržištu se smatra da je period od pet godina dovoljan ciklus za tehnološku revoluciju i ekspanziju potpuno novih servisa/proizvoda [37].

### 3.4 Difuzioni modeli

Difuzioni modeli prikazuju kako se proces prihvatanja servisa/proizvoda odvija na tržištu tokom celokupnog životnog ciklusa. Brzina kojom će novi telekomunikacioni servisi biti prihvaćeni na tržištu su važan parametar za procenu ukupne tražnje, procene



rizika opravdanosti investiranja u servise/proizvode, planiranja finansijskih sredstava, kao i organizacionih resursa potrebnih za uspešnu eksploataciju servisa/proizvoda [37]. Upotreba difuzionih modela je izuzetno korisna kod novih servisa/proizvoda, koji su se tek pojavili na tržištu, gde ne postoje statistički podaci o prodaji i gde priroda ponude novog servisa/proizvoda tržištu ima novu dimenziju. Difuzioni modeli su našli široku primenu u marketingu, pre svega kako bi prikazali dinamiku životnog ciklusa novog servisa/proizvoda za prognoziranje tražnje, kao i pomoć prilikom strateškog izbora pre i posle plasiranja novog servisa/proizvoda na tržište [37].

Vremenom su difuzioni modeli postali kompleksniji, s obzirom na zahteve menadžera za proširenjem njihove korisnosti u funkciji alata kod donošenja odluka. Jedan od dodatnih zahteva koji se nameće difuzionim modelima jeste uvođenje u model eksternih uticaja, kao što su *marketing-mix* promenljive, jednog od najpoznatijih alata koji se koriste pri reklamiranju servisa/proizvoda. U stvarnosti prodaja zavisi od niza eksternih uticaja, kao što su nivo reklamiranja servisa/proizvoda, pristupačnost cene i promene u ceni, intenzitet distribucije, od važnosti je stvoriti takav model koji će obuhvatati ove promenljive i njima slične. Praktično postoje dva pristupa rešavanju ovog problema. Neki autori predlažu modele sa konstantnim *marketing-mix* parametrima, dok drugi autori uvode vremenski zavisne parametre [37].

Modeli koji imaju konstantne parametre pretpostavljaju da je menadžer u mogućnosti da predvidi kako će se eksterne promenljive ponašati tokom dužeg vremena. Međutim, praktično je nemoguće precizno predvideti ponašanje tržišta u budućnosti, tako da je vrlo verovatno da će vremenom menadžeri morati da prilagode model tržištu kroz promenu nekog od parametara, kao što su cena, reklama i sl. [37].

Osnovne pretpostavke kod primene difuzionih modela su [37]:

- proces difuzije je binarni proces (korisnik ili prihvata ili čeka da prihvati novi servis/proizvod);
- primenljivi su na nove kategorije servisa/proizvoda, a ne na nove brendove;
- svaki korisnik pribavlja samo jedan novi servis/proizvod;
- nema ponovljenih kupovina;
- primenljivi su na nove servise/proizvode koji egzistiraju duže vreme na tržištu;

- ukupna veličina tržišta (potencijal tržišta) je fiksna veličina, pod pretpostavkom da će svi korisnici tokom vremena prihvatiti novi servis/proizvod;
- proces difuzije se posmatra nezavisno od uticaja supstitucionih servisa/proizvoda;
- nije eksplicitno uključena marketing strategija.

Proces difuzije najčešće se opisuje kao rezultat dva nezavisna uticaja: mas-medija i efekta *Word-of-Mouth* (WoM) [52]. Efekat mas-medija se odnosi na korisnike zainteresovane za servise/proizvode koji su inovativni. Ovaj segment tržišta je pod jakim uticajem reklama, koje kod korisnika stvaraju osećaj svesnosti i prisutnosti novog servisa/proizvoda. Sa druge strane, WoM efekat tj. usmeno prenošenje iskustva veći je po pitanju uticaja na brzinu difuzije [37], [53].

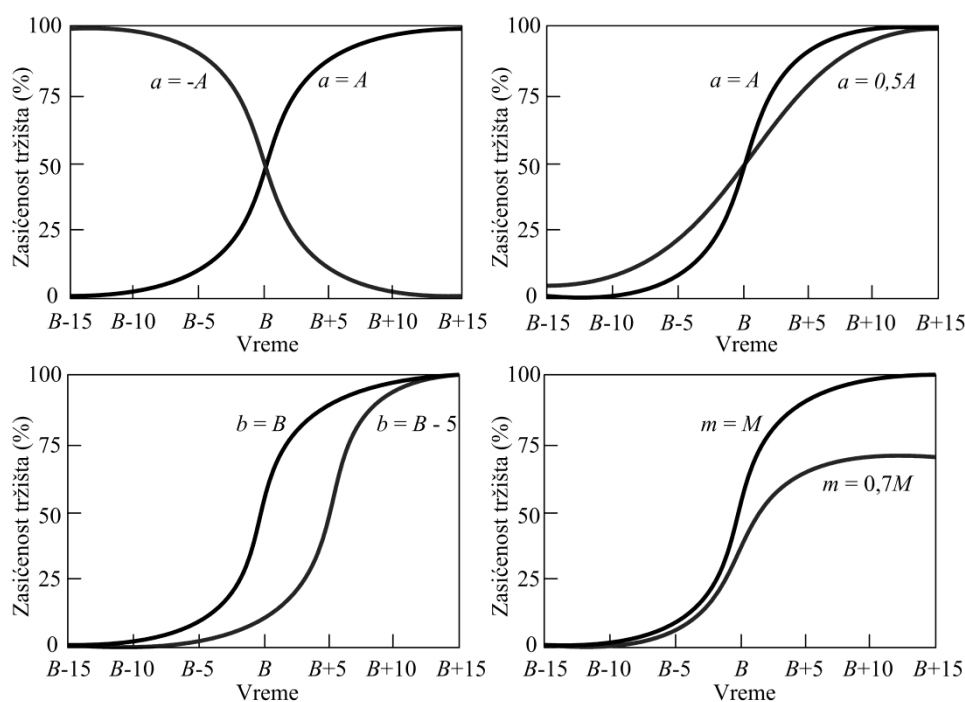
Cilj difuzionih modela može se svesti na predstavljanje životnog ciklusa inovativnog odnosno novog servisa/proizvoda, tokom vremena. Difuzija inovacija je studija o tome kako, zašto i kojom brzinom se novi servisi, proizvodi ili tehnologije prihvataju u društvenoj zajednici. Utvrđeno je da se rast velikog broja fenomena može opisati preko krive "S" oblika. Oblik "S" krive može se objasniti primenom teorije difuzije koja se bavi izučavanjem komunikacionih kanala, odnosno sredstava pomoću kojih se informacije i iskustva o inovativnom servisu/proizvodu prenose u društvu [37]. Osnovni modeli koji se grafički predstavljaju u obliku slova "S", a koriste se za prognoziranje prihvatanja i rasta novih servisa/proizvoda, su: logistički model, *Richards-ov* model [54] i *Bass-ov* model [52]. Ovi modeli se mogu koristiti za prognoziranje prihvatanja novog servisa/proizvoda, kada se konkurentski servisi/proizvodi na tržištu mogu zanemariti. Logistički i *Richards-ov* model nisu pogodni za modeliranje prihvatanja servisa/proizvoda odmah po njihovom pojavljivanju na tržištu tj. kada se raspolože sa malim brojem realnih podataka, i u tom slučaju pogodnija je primena *Bass-ovog* modela [37].

### 3.4.1 Logistički model

Logističkim modelom može se predstaviti rast broja korisnika  $L(t)$  u okviru posmatranog perioda na zatvorenom tržištu, bez uticaja bilo kog drugog servisa. Model može biti definisan preko tri parametra [37], [55]:

$$L(t) = \frac{m}{1 + e^{-a(t-b)}}, \quad (3.1)$$

pri čemu su:  $m$  maksimalni potencijal tržišta,  $a$  parametar rasta,  $b$  vremenski parametar. U zavisnosti od vrednosti parametara  $a$ ,  $b$  i  $m$ , "S kriva" može imati različite oblike, kao što je to prikazano na Slici 19.



Slika 19. Efekti promene parametara ( $a$ ,  $b$ , i  $m$ ) na oblik "S krive" [37]

Najpre je ilustrovan pozitivan i negativan parametar rasta  $a$ . Potom je dat primer smanjenja parametra rasta  $a$ , za 50%. Takođe, prikazano je smanjenje vremenskog parametra  $b$ , za 5 vremenskih jedinica, kao i smanjenje potencijala tržišta  $m$ , za 30% [37].

Model predstavljen relacijom (3.1) predstavlja rešenje diferencijalne jednačine (3.2), koja se sastoji od člana eksponencijalnog rasta i člana koji predstavlja negativnu povratnu snagu [37]:

$$\frac{dL(t)}{dt} = aL(t) \cdot \left(1 - \frac{L(t)}{m}\right) \quad (3.2)$$

U početku, rast logističkog modela je identičan eksponencijalnom rastu. Nakon početnog rasta negativna povratna sprega usporava rast, kako se funkcija  $L(t)$  približava maksimalnoj vrednosti  $m$  [37]. Prvi izvod funkcije  $L(t)$

$$L'(t) = \frac{dL(t)}{dt} = \frac{a \cdot m \cdot e^{-a(t-b)}}{\left[1 + e^{-a(t-b)}\right]^2}, \quad (3.3)$$

predstavlja funkciju priraštaja broja korisnika (nivo prodaje servisa/proizvoda)  $i$ , za razliku od funkcije kumulativnog broja korisnika, njen grafik ima oblik zvona (Slika 20). Broj novih korisnika servisa/proizvoda, na intervalu  $(t_1, t_2)$  određen je relacijom [37]

$$l(t) = L(t_2) - L(t_1) \approx (t_2 - t_1) L' \left( \frac{t_2 + t_1}{2} \right) \quad (3.4)$$

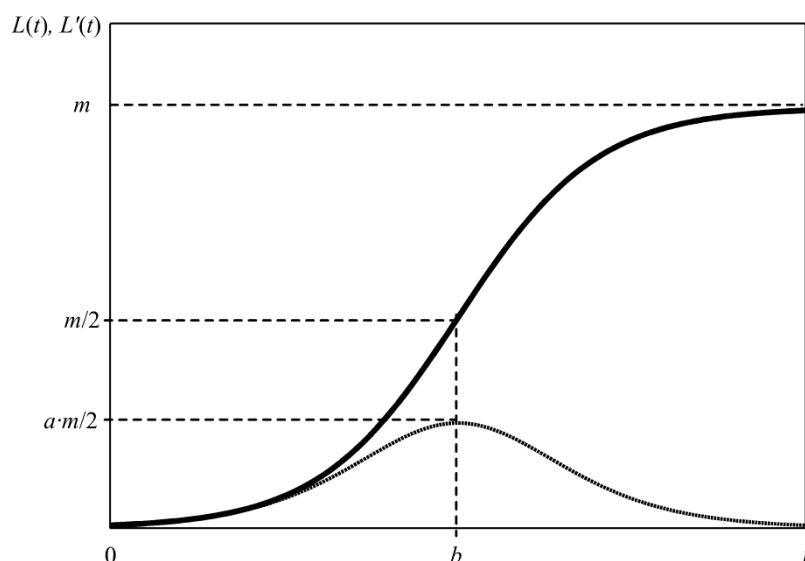
Izračunavanjem drugog izvoda

$$L''(t) = \frac{d^2L(t)}{dt^2} = \frac{-a^2 \cdot m \cdot e^{-a(t-b)} \cdot (1 - e^{-a(t-b)})}{\left(1 + e^{-a(t-b)}\right)^3} \quad (3.5)$$

i rešavanjem jednačine  $L''(t) = 0$ , dobija se prevojna tačka za  $t = b$ , a takođe određuje i maksimum funkcije  $L'(t)$  [37]

$$\max L'(t) = L'(b) = \frac{a \cdot m}{4} \quad \text{za } a > 0. \quad (3.6)$$

Na Slici 20, [37] predstavljene su karakteristične vrednosti i tačke logističkog modela.



Slika 20. Karakteristične vrednosti i tačke logističkog modela [37]

Asimptote funkcije logističkog rasta za pozitivan i negativan parametar  $a$  mogu se izraziti kao

$$\lim_{t \rightarrow -\infty} \begin{cases} L(t) = 0 & \text{za } a > 0 \\ L(t) = m & \text{za } a < 0 \end{cases} \quad \lim_{t \rightarrow +\infty} \begin{cases} L(t) = m & \text{za } a > 0 \\ L(t) = 0 & \text{za } a < 0 \end{cases}. \quad (3.7)$$

Navedene karakteristike logističkog modela mogu se upotrebiti kao ulazni podaci za ocenu ili određivanje parametara modela namenjenih prognoziranju prihvatanja novih servisa/proizvoda na tržištu [37].

### 3.4.1.1 Logistički model definisan na osnovu dve tačke

Logistički model je moguće predstaviti preko parametara  $t_s$  i  $\Delta t$ , umesto  $a$  i  $b$ , uvođenjem dodatnih parametara  $u$  i  $v$  ( $0 < u < v < 1$ ), pri čemu  $t_s$  predstavlja trenutak pojavljivanja servisa/proizvoda na tržištu sa nivoom penetracije  $u$ , a  $\Delta t$  period neophodan da penetracija dostigne nivo  $v$  [37], [55]. Rešavanjem sistema jednačina

$$u = \frac{1}{1 + e^{-a(t_s - b)}}, \quad (3.8)$$

$$v = \frac{1}{1 + e^{-a(t_s + \Delta t - b)}}.$$

dobijaju se izrazi za parametre  $a$  i  $b$ , koji zavise od ulaznih parametara  $u$ ,  $v$  i  $\Delta t$

$$a = \frac{1}{\Delta t} \left[ \ln \left( \frac{1}{u} - 1 \right) - \ln \left( \frac{1}{v} - 1 \right) \right], \quad (3.9)$$

$$b = t_s + \Delta t \frac{\ln \left( \frac{1}{u} - 1 \right)}{\ln \left( \frac{1}{u} - 1 \right) - \ln \left( \frac{1}{v} - 1 \right)}. \quad (3.10)$$

Za primenu ove modifikacije logističkog modela neophodno je proceniti pored parametara:  $m$ ,  $t_s$  i  $\Delta t$ , početni i krajnji nivo penetracije:  $u$  i  $v$ . U slučaju da je  $u = 1 - v$ , izrazi (3.9) i (3.10) se mogu predstaviti u pojednostavljenoj formi [37]:

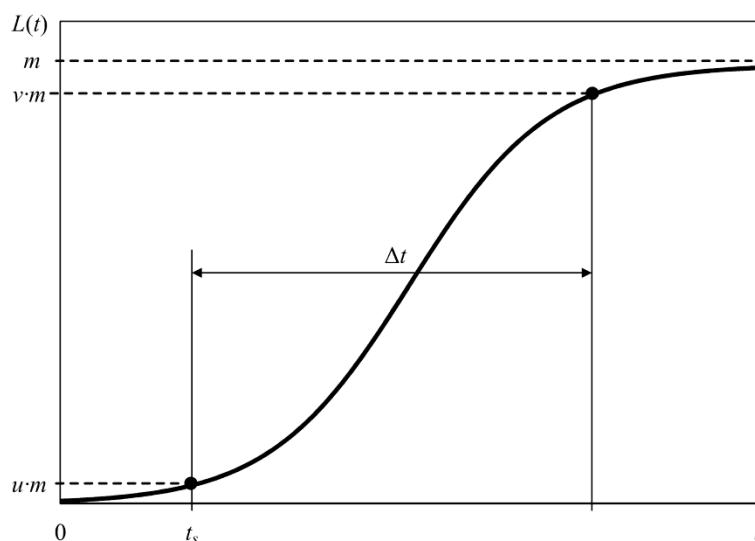
$$a = \frac{2}{\Delta t} \ln \left( \frac{1}{u} - 1 \right), \quad (3.11)$$

$$b = t_s + \frac{\Delta t}{2}. \quad (3.12)$$

Tada se model svodi na samo jedan parametar  $u$ , uz uslov  $0 < u < 1$ ,

$$L(t) = \frac{m}{1 + \left( \frac{1}{u} - 1 \right)^{1 - 2(t - t_s)/\Delta t}}. \quad (3.13)$$

Na Slici 21 prikazan je grafik logističkog modela definisanog preko parametara  $m$ ,  $t_s$ ,  $\Delta t$ ,  $u$  i  $v$ . Ovo pojednostavljenje daje mogućnost prognoziranja prihvatanja novih servisa/proizvoda kada postoji mali broj raspoloživih podataka [37].



Slika 21. Logistički model definisan preko parametara  $m$ ,  $t_s$ ,  $\Delta t$ ,  $u$  i  $v$  [37]

### 3.4.1.2 Logistički model definisan u jednoj tački

Modifikacija klasičnog logističkog modela (3.1) koja uključuje vrednosti statističkog para  $(t_p, N(t_p))$ , naziva se lokalni logistički model,  $LL(t)$  [37], koji je predstavljen funkcijom

$$LL(t) = \frac{mN(t_p)}{N(t_p) + (m - N(t_p)) \cdot e^{-a(t-t_p)}} \quad (3.14)$$

Lokalni logistički model koristi se za prognoziranje od poslednjeg posmatranog trenutka  $t \geq t_p$ , kad je, i pored postojećih statističkih podataka, praktično nemoguće odrediti njihovu funkcionalnu zavisnost [37], [56].

### 3.4.1.3 Nedostaci logističkog modela

Iako se logistički model široko primenjuje u svrhu prognoziranja, nije pogodan za modeliranje prihvatanja servisa/proizvoda kada se broj korisnika brzo povećava, nakon što se servis/proizvod pojavi na tržištu. Razlog tome je što logistička kriva u početnoj fazi sporo raste. Ovaj problem postoji u samoj formulaciji logističkog modela, jer nije moguće modelirati trenutak kad se servis/proizvod pojavi na tržištu, tj. kada je penetracija 0 ( $u = 0$ ), zbog toga što jednačina daje beskonačnu vrednost za parametar  $a$ . Ovaj nedostatak je rešen kod *Bass*-ovog modela [37].

Drugi nedostatak predstavlja fiksna prevojna tačka  $(b, m/2)$ , koja nije značajna za većinu tehnika prognoziranja. Taj problem rešava *Richards*-ov model rasta, koji se naziva i četvoro-parametarski logistički model [37].

## 3.4.2 Richards-ov model

*Richards*-ov model rasta [54] se najčešće predstavlja funkcijom

$$R(t) = \frac{m}{[1 + e^{-a(t-b)}]^c}, \quad (3.15)$$

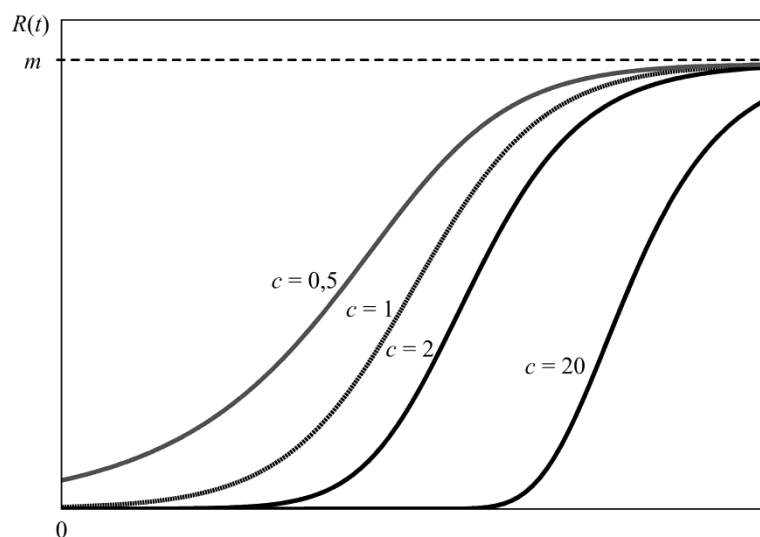
pri čemu su:  $m$  potencijal tržišta,  $a$  parametar rasta,  $b$  vremenski parametar, a  $c$  parametar koji određuje položaj prevojne tačke (Slika 22) [37]. Funkcija (3.15) ima prevojnu tačku

$$R(t^*) = m \cdot \left( \frac{c}{c+1} \right)^c, \text{ za } t^* = b + \frac{\ln c}{a} \quad (3.16)$$

koja dostiže minimalnu vrednost kada  $c \rightarrow \infty$  i ne može biti manja od  $m/e \approx 0,368m$ . Za  $c = 1$ , *Richards*-ov model se svodi na logistički model i tada je  $R(t^*) = 0,5m$  [37]. Maksimalna vrednost prevojne tačke  $R(t^*)$  teži  $m$  kada  $c$  teži nuli, tako da važi relacija

$$e^{-1} < \frac{R(t_i)}{m} = \left( \frac{c}{1+c} \right)^c < 1 \quad (3.17)$$

Primena *Richards*-ovog modela za različite vrednosti parametra  $c$ , prikazana je na Slici 22.



Slika 22. Primena *Richards*-ovog modela za različite vrednosti parametra  $c$  [37]

Kao i logistički model, *Richards*-ov model ne može da modelira trenutak u kome se servis/proizvod uvodi na tržište ( $N(t) = 0$ ), jer samo kada  $t \rightarrow -\infty$ ,  $R(t)$  teži 0 [37].

### 3.4.3 Rogers-ov model sa klasičnom normalnom raspodelom

*Rogers*-ov difuzioni model [57] može se predstaviti klasičnom krivom normalne raspodele, u obliku zvona, koja predstavlja prihvatanje novog servisa/proizvoda od strane korisnika, tokom vremena. Proces difuzije novog servisa/proizvoda zavisi od dva osnovna faktora: inovatora i imitatora. Inovatore pokreće želja da probaju novi servis/proizvod. To su najčešće osobe koje prate naučno-tehnička dostignuća i prvi

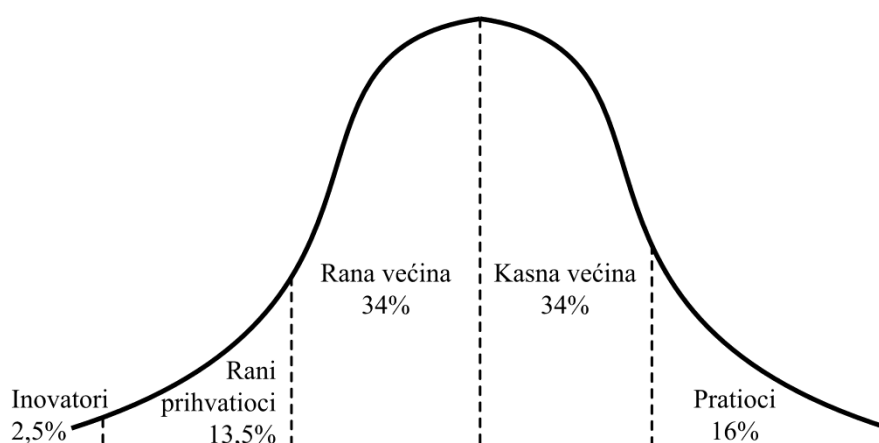


pribavljaju novi servis/proizvod, nezavisno od stvarne potrebe. Međutim, imitatori predstavljaju stvarnu osnovu širenja inovacija. Upravo ovi faktori oblikuju krivu difuzije novog servisa/proizvoda [37].

Životni ciklus novog servisa/proizvoda, prema *Rogers-u*, ima sledeće kategorije korisnika (Slika 23), [37], [57]:

- **inovatori** (najčešće su to avanturisti, obrazovani korisnici sa višestrukim izvorima informacija i većom sklonošću ka riziku);
- **rani prihvatilioci** (uglavnom socijalne vođe, popularne i obrazovane korisnike);
- **rana većina** (korisnici koji su odlučni u pribavljanju nekog novog servisa/proizvoda i najčešće imaju višestruke neformalne društvene kontakte);
- **kasna većina** (karakteriše ih skepticizam, po prirodi su tradicionalni i uglavnom su nižeg socijalno-ekonomskog statusa);
- **pratioci** (korisnici koji među poslednjima prihvataju novi servis/proizvod, ugledajući se na prijatelje i komšije).

Ukoliko je fokus prilikom donošenja poslovnih odluka na *Rogers-ovom* tumačenju životnog ciklusa servisa/proizvoda, onda se pažnja donosioca odluke mora usmeriti na: kategorije korisnika i ponašanje korisnika (vreme i brzinu prihvatanja).



Slika 23. Kategorije korisnika *Rogers-ovog* difuzionog modela [37]

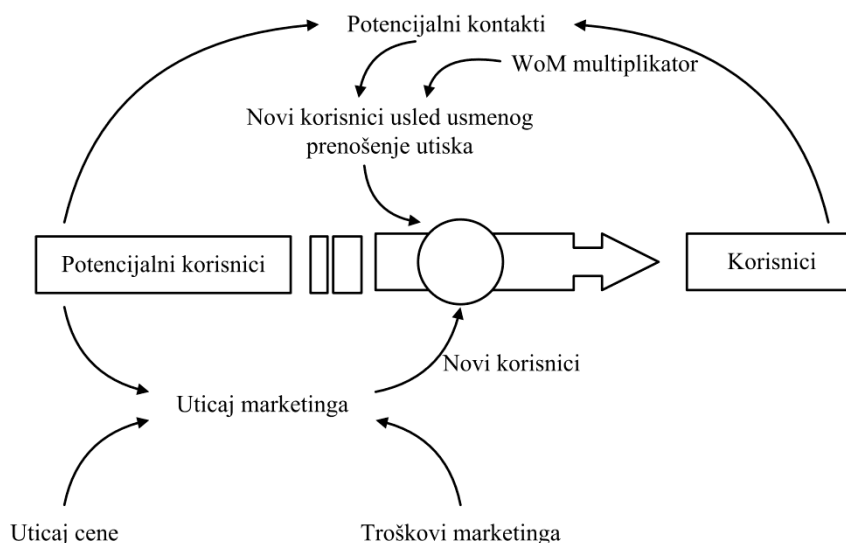
*Rogers*-ova teorija se bazira na činjenici da će se inovacija širiti kroz socijalni sistem prateći krivu oblika zvona, tako što novi servis/proizvod najpre prihvataju inovatori, zatim tzv. rani prihvatoci koji među prvima pribavljaju novi servis/proizvod, zatim ih prati rana i kasna većina, sve dok servis/proizvod ne postane uobičajen (pratioci) [37]. Analogno tome, difuzija novog servisa/proizvoda kao proces odvija se kroz pet etapa [37]:

1. znanje (učenje o postojanju i funkciji inovacije);
2. ubeđivanje (postati uveren u vrednosti koju donosi inovacija);
3. odluka (prihvatanje inovacije);
4. implementacija (upotreba inovacije);
5. potvrda (konačno prihvatanje inovacije tokom vremena, ili odbijanje inovacije).

#### **3.4.4 Bass-ov difuzioni model**

Prvi difuzioni model koji je upotrebljen u marketingu bio je *Bass-ov* model [52]. *Bass-ov* difuzioni model opisuje proces prihvatanja novog servisa/proizvoda kroz interakciju između postojećih korisnika i potencijalnih korisnika. Ovaj model je našao primenu pre svega u prognoziranju prihvatanja novih servisa/proizvoda i tehnologija. Difuzioni proces je rezultat dva nezavisna uticaja: mas-medija i WoM efekta. Efekat mas-medija se odnosi na korisnike zainteresovane za servise/proizvode koji su inovativni i najbolji. Ovaj segment tržišta je pod jakim uticajem reklama, koje kod korisnika stvaraju osećaj svesnosti i prisutnosti servisa. Sa druge strane, efekat usmenog prenošenja iskustva se više odražava na dinamiku prihvatanja novog servisa/proizvoda [37].

Ove uticaje *Bass-ov* model kvantifikuje kroz vrednosti parametara inovacije i imitacije, koji definišu različite brzine procesa difuzije. *Bass* je izneo tvrdnju da je verovatnoća kupovine nekog novog servisa/proizvoda linearna funkcija broja prethodnih prodaja. Ove linearne koeficijente on je povezao sa karakteristikama inovacije i imitacije. Princip funkcionisanja *Bass-ovog* modela prikazan je na Slici 24 [37].



Slika 24. Princip funkcionisanja Bass-ovog modela [37]

Najčešće se novi korisnici formiraju nakon kontakta sa postojećim korisnicima, odnosno nakon što postojeći korisnici usmeno prenesu svoja iskustva potencijalnim korisnicima. Međutim, usmeno prenošenje iskustava nije dovoljno kako bi se svest o kvalitetnom servisu/proizvodu brzo proširila u društvu. Zbog toga, *Bass-ov* model poseduje i sposobnost modeliranja konstantnog priliva novih korisnika kao rezultat reklamnih aktivnosti [37].

Faktori koji utiču na brzinu difuzije mogu se u osnovi grupisati na one koji se odnose na karakteristike novog servisa/proizvoda (prednosti u odnosu na postojeće, stepen kompatibilnosti, složenost samog servisa/proizvoda sa aspekta korišćenja, pogodnosti i sl.) i one na koje se može uticati odgovarajućom strategijom marketinga (reklama, promotivne kampanje i sl.) [37].

#### 3.4.4.1 Karakteristike *Bass-ovog* modela

Polazna hipoteza *Bass-ovog* modela [52] se odnosi na linearnu zavisnost verovatnoće prihvatanja servisa/proizvoda  $P(t)$  od kumulativnog broja korisnika  $N(t)$ , u trenutku  $t$  [37]:

$$P(t) = p + (q/m)N(t), \quad (3.18)$$

pri čemu su parametri  $p$ ,  $q$  i  $m$  konstante. Parametar inovacije  $p$  predstavlja verovatnoću inicijalne kupovine u trenutku  $t = 0$ , a njegova vrednost se reflektuje na eksterni uticaj

(inovatori) u društvenom sistemu. Parametar imitacije  $q$  predstavlja verovatnoću kasnijeg prihvatanja inovacije u društvu, a  $m$  predstavlja potencijal tržišta.

Difuzioni proces se, prema Bass-ovom modelu, može predstaviti diferencijalnom jednačinom [37]

$$\frac{dN(t)}{dt} = \left( p + \frac{q}{m} N(t) \right) (m - N(t)) \quad (3.19)$$

Ako se uvede da je deo tržišta koji prihvata proizvod do posmatranog trenutka  $t$  funkcija raspodele  $F(t) = N(t)/m$ , model se može analizirati preko relacije [52], [58]:

$$\frac{dF(t)}{dt} = (p + qF(t))(1 - F(t)) \quad (3.20)$$

Ako je  $N(0)=0$  za  $t=t_0=0$ , rešenje diferencijalne jednačine (3.19) predstavlja vremensku zavisnost difuzionog procesa

$$N(t) = m \cdot \frac{1 - e^{-(p+q)t}}{1 + \frac{q}{p} e^{-(p+q)t}} \quad (3.21)$$

Grafik funkcije (3.21) ima oblik "S krive" (Slika 25), čija se prevojna tačka (maksimum funkcije penetracije) određuje preko drugog izvoda [37]. Prvi izvod funkcije (7.4) je funkcija priraštaja broja korisnika

$$N'(t) = \frac{dN(t)}{dt} = m \cdot \frac{(p+q)^2}{p} \cdot \frac{e^{-(p+q)t}}{\left[ 1 + \frac{q}{p} e^{-(p+q)t} \right]^2} \quad (3.22)$$

i predstavlja nivo prodaje proizvoda, odnosno nivo prihvatanja servisa u trenutku  $t$ . Izračunavanjem drugog izvoda

$$N''(t) = \frac{d^2N(t)}{dt^2} = m \cdot \frac{(p+q)^3}{p} \cdot \frac{\left( \frac{q}{p} e^{-(p+q)t} - 1 \right) \cdot e^{-(p+q)t}}{\left[ 1 + \frac{q}{p} e^{-(p+q)t} \right]^3} \quad (3.23)$$

i rešavanjem uslova  $N''(t) = 0$ , dobija se prevojna tačka za  $t = t^*$ , određena sa

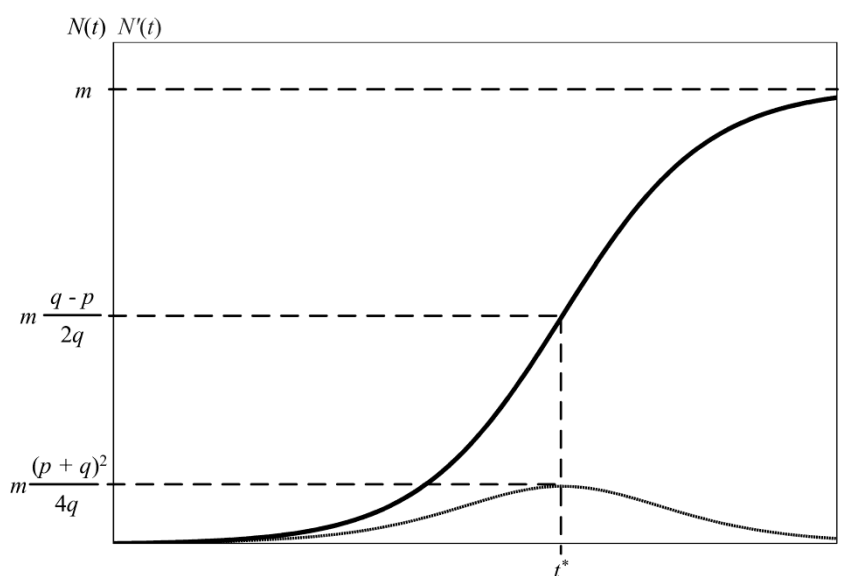
$$t^* = \frac{1}{p+q} \ln\left(\frac{q}{p}\right) \quad (3.24)$$

i

$$N^* = m \frac{(q-p)}{2q} \quad (3.25)$$

Funkcija priraštaja broja korisnika dostiže maksimalnu vrednost  $s^*$  u istom trenutku  $t^*$  [37]

$$s^* = \begin{cases} m \frac{(p+q)^2}{4q}, & q > p \\ m \cdot p, & q \leq p \end{cases} \quad (3.26)$$



Slika 25. Funkcije Bass-ovog difuzionog modela [37]

Na osnovu relacije (3.18) i Bayes-ove teoreme, važi da je

$$\frac{f(t)}{1-F(t)} = P(t) = p + \frac{q}{m} N(t) = p + qF(t) \quad (3.27)$$

pri čemu je

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}, \quad F(0) = 0 \quad (3.28)$$

Takođe, kumulativni broj korisnika servisa na intervalu  $[0, t]$  moguće je predstaviti iz osnovnih pretpostavki modela, relacijom [37]

$$N(t) = \int_0^t s(t) dt = m \int_0^t f(t) dt = mF(t), \quad (3.29)$$

pri čemu je  $s(t)$  intenzitet prodaje servisa/proizvoda u trenutku  $t$  [37]. Na osnovu relacija (3.27) i (3.29) intenzitet prihvatanja servisa (broj novih korisnika) u trenutku  $t$  može se izraziti kao

$$s(t) = m f(t) = P(t) [m - N(t)] = \left[ p + \frac{q}{m} \int_0^t s(t) dt \right] \left[ m - \int_0^t s(t) dt \right] \quad (3.30)$$

Razvojem proizvoda u relaciji (3.30) dobija se osnovni oblik *Bass*-ovog modela

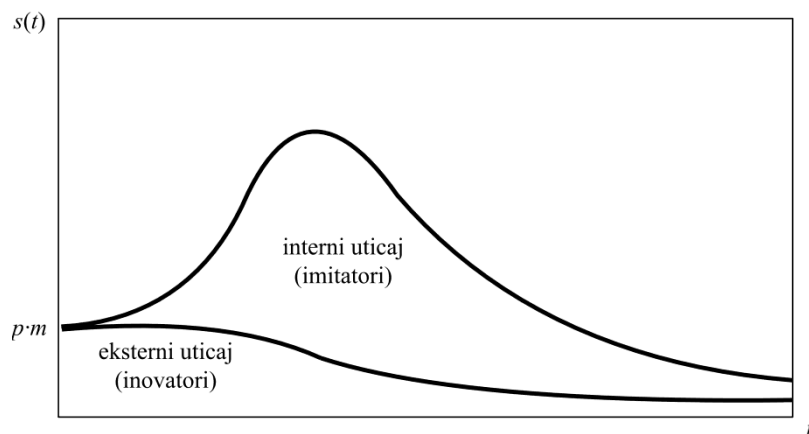
$$s(t) = pm + (q - p)N(t) - \frac{q}{m}N^2(t) \quad (3.31)$$

Sagledavanjem predstavljenog modela dolazi se do zaključka da u prihvatanju nekog servisa/proizvoda učestvuju inovatori (eksterni uticaj) i imitatori (interni uticaj), uz veći uticaj inovatora. Na imitatore utiče broj korisnika servisa/proizvoda do trenutka  $t$ , dok to nije slučaj sa inovatorima. Takođe, imitatori na neki način "uče" iz iskustava inovatora. Uticaj inovatora je u početku eksploatacije servisa veći, a tokom vremena se smanjuje. Uticaj inovatora i imitatora na nivo prihvatanja servisa (broj novih korisnika) prikazan je na Slici 26 [37].

Ukupni potencijal tržišta,  $m$ , čine svi potencijalni korisnici servisa/proizvoda. U proceni ovog parametra mogu učestvovati: ukupna populacija, broj domaćinstava, ekonomski status pojedinaca i društva u celini, demografska struktura, natalitet, prisustvo konkurencije na tržištu, navike korisnika i sl. [37]

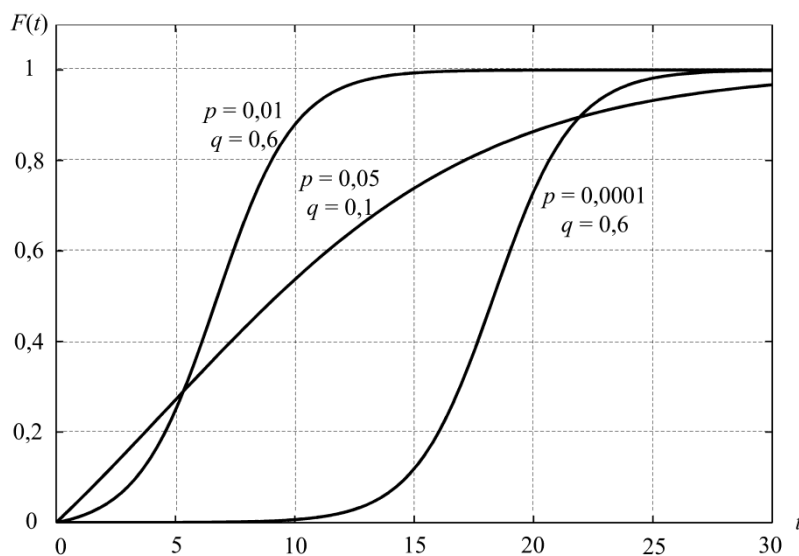
*Bass*-ov model predstavlja, u smislu fleksibilnosti, veoma pogodan model za prognoziranje prihvatanja novog servisa/proizvoda. Međutim, njegov značajan nedostatak odnosi se na mogućnost procene parametara modela. Modifikacije ovog modela uvode dodatne parametre, koji proširuju oblasti primene i odnose se na kasnije

faze životnog ciklusa servisa/proizvoda. Povećanjem broja parametara povećava se i broj potrebnih podataka za njihovo određivanje [37].



Slika 26. Eksterni i interni uticaj na nivo prihvatanja servisa tokom vremena [37]

Kako se vrednosti parametara Bass-ovog modela  $p$  i  $q$  odražavaju na brzinu difuzije ilustrovano je primerima na Slici 27 [37].



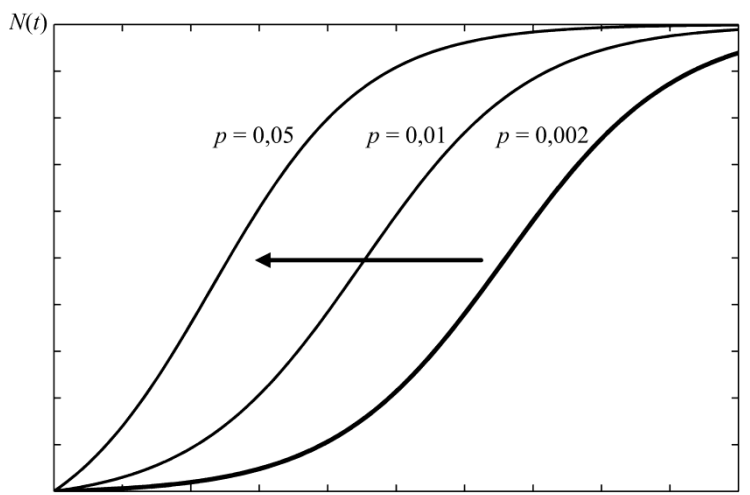
Slika 27. Uticaj promene parametara  $p$  i  $q$  na brzinu difuzije [37]

U specijalnim slučajevima, kada je  $p = 0$ , Bass-ov model se svodi na logistički, a kada je  $q = 0$ , ovaj model se svodi na eksponencijalni.

### 3.4.4.2 Procena parametara Bass-ovog modela

Difuzioni modeli, zasnovani na konceptu inovacije i imitacije, imaju dve osnovne primene. Modeliranje scenarija uvođenja servisa/proizvoda na tržište može predstavljati koristan alat u izboru odgovarajuće politike cena i marketing strategije i potom, nakon faze uvođenja na tržište kod analize različitih scenarija šireg prihvatanja posmatranog novog servisa/proizvoda [37].

Prilikom modeliranja procesa difuzije na tržištu posmatraju se dva segmenta korisnika: inovatori i imitatori. Inovatori predstavljaju kategoriju korisnika koji prate razvoj nauke i tehnologije i odmah prihvataju novi servis/proizvod koji se pojavi na tržištu. Njihova iskustva se prenose na imitatore, putem različitih vidova socijalnog komuniciranja. Sam proces difuzije karakterišu dva parametra,  $p$  koji predstavlja brzinu kojom započinje prihvatanje servisa/proizvoda i  $q$  koji predstavlja brzinu kojom se dešava kasniji rast. Jeftinija tehnologija može imati veće  $p$  (brže će doći do rasta krive), dok tehnologije sa mrežnim efektom (kod kojih vrednost raste kako više korisnika prihvata posmatrani servis/proizvod) mogu imati veće  $q$ . Na slikama 28 i 29, prikazane su promene oblika krive u zavisnosti od promene parametara  $p$  i  $q$  [37].

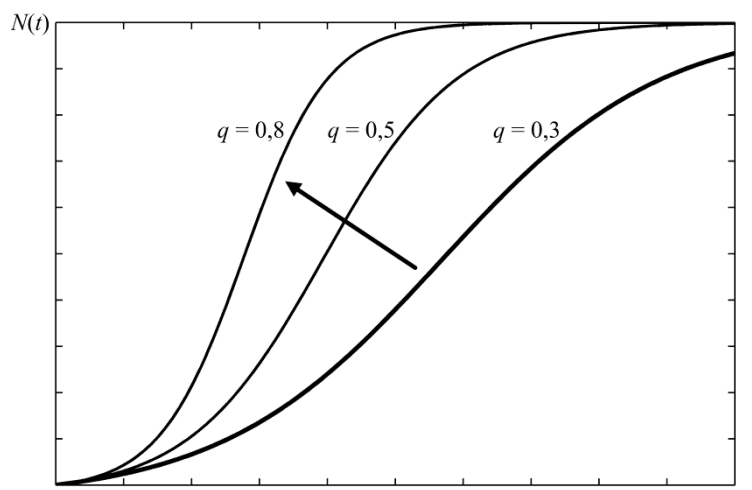


Slika 28. Efekat povećanja parametra inovacije [37]

Vrednosti parametara  $p$  i  $q$  variraju u zavisnosti od servisa koji se posmatra, regiona, veličine nacionalnog dohotka, kao i kulturnih i socijalnih aspekata u društvu, tako da se ovi parametri, za isti servis, mogu razlikovati po posmatranim saobraćajnim područjima različitih zemalja. Mentalitet ima značajan uticaj na imitacioni faktor, dok



zemlje sa velikom kupovnom moći po glavi stanovnika teže visokom stepenu inovacije. Visoki parametri imitacije javljaju se kod servisa/proizvoda koji imaju mrežni efekt (faksimil) [59]. Tržišni analitičari su ustanovili da je procenat inovatora u zemljama Evropske unije veći nego u SAD, dok je procentualna vrednost imitatora u Aziji za četvrtinu manja nego u SAD i Evropi [43].



Slika 29. Efekat povećanja parametra imitacije [37]

Za zemlje u razvoju, srednja vrednost parametra inovacije  $p$  je 0,0003, a za razvijene zemlje 0,001. Za zemlje u razvoju, srednja vrednost parametra imitacije  $q$  je 0,56, dok je za razvijene zemlje ta vrednost 0,51 [60]. Industrijske i medicinske inovacije imaju generalno viši parametar imitacije od ostalih.

### 3.4.4.3 Eksplicitno određivanje parametara Bass-ovog modela

Primenljivost Bass-ovog modela zavisi od uspešnosti procene njegovih parametara [61]. Za njihovo eksplicitno određivanje moguće je primeniti razne matematičke tehnike, od kojih su najznačajnije [37], [62]:

- klasična metoda najmanjih kvadrata (*Ordinary Least Squares* - OLS),
- procena maksimalne verodostojnosti (*Maximum Likelihood Estimation* - MLE),
- nelinearna metoda najmanjih kvadrata (*Nonlinear Least Squares* -NLS) i
- algebarska metoda.

Pri poređenju navedenih tehnika utvrđena je dominantnost NLS metode u odnosu na ostale, u pogledu preciznosti predikcije i validnosti estimacije standardnih odstupanja [63]. Međutim, na osnovu sprovedene analize, takođe je naglašena jednostavnost OLS i algebarske tehnike [37].

Za eksplicitno određivanje parametara  $p$ ,  $q$  i  $m$  na osnovu diskretnih vremenskih podataka Bass je izveo regresionu analogiju za relaciju (31), u obliku [37], [52]:

$$s_t = a + bN_{t-1} + cN_{t-1}^2 \quad (3.32)$$

pri čemu je  $s_t$  broj novih korisnika u diskretnom trenutku  $t$ , a kumulativni broj korisnika  $N_{t-1}$  u trenutku  $t-1$  je

$$N_{t-1} = \sum_{i=1}^{t-1} s_i \quad (3.33)$$

Parametri  $p$ ,  $q$  i  $m$  se estimiraju preko regresionih parametara  $a$ ,  $b$  i  $c$  na osnovu sistema jednačina:

$$a = pm, \quad b = q - p, \quad c = -\frac{q}{m} \quad (3.34)$$

čijim rešavanjem se dobija

$$p = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2}, \quad q = \frac{b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2} \quad \text{i} \quad m = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2c} \quad (3.35)$$

Jedna od prvih predloženih procedura za određivanje parametara Bass-ovog modela je konvencionalna metoda najmanjih kvadrata. Ova tehnika daje eksplicitna rešenja i relativno lako se primenjuje. Ukoliko se posmatra regresiona analogija modela, data relacijom (32), odgovarajuća funkcija cilja, izražena preko sume kvadrata odstupanja, tada ima oblik [37]

$$S = \sum_{t=1}^n \left( s_t - a - bN_{t-1} - cN_{t-1}^2 \right)^2. \quad (3.36)$$

Potrebni parametri se određuju preko uslova minimiziranja funkcije cilja. Tada su uslovi lokalnog ekstrema (preko parcijalnog diferenciranja) za funkciju  $S(a, b, c)$  [37]:

$$\frac{\partial S}{\partial a} = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial b} = 0 \quad \text{i} \quad \frac{\partial S}{\partial c} = 0.$$

Na osnovu ovih uslova formira se odgovarajući sistem linearnih jednačina sa tri nepoznate [37]

$$\begin{aligned} \sum_{t=1}^n s_t &= an + b \sum_{t=1}^n N_{t-1} + c \sum_{t=1}^n N_{t-1}^2 \\ \sum_{t=1}^n s_t N_{t-1} &= a \sum_{t=1}^n N_{t-1} + b \sum_{t=1}^n N_{t-1}^2 + c \sum_{t=1}^n N_{t-1}^3 \\ \sum_{t=1}^n s_t N_{t-1}^2 &= a \sum_{t=1}^n N_{t-1}^2 + b \sum_{t=1}^n N_{t-1}^3 + c \sum_{t=1}^n N_{t-1}^4 \end{aligned} \quad (3.37)$$

Iz sistema jednačina (3.37) mogu se izračunati regresioni parametri  $a$ ,  $b$  i  $c$ , odnosno, korišćenjem (3.35), odrediti parametri *Bass*-ovog modela  $p$ ,  $q$  i  $m$ .

*Schmittlein* i *Mahajan* [64] su predložili MLE postupak za estimiranje parametara *Bass*-ovog modela u kontinualnom obliku, koji donekle prevazilazi nedostatke OLS metode [37]. Funkcija verodostojnosti

$$L = (1 - G(t-1))^{(M - N_{t-1})} \prod_{i=1}^t (G(i) - G(i-1))^{(N_i - N_{i-1})} \quad (3.38)$$

je definisana preko alternativne funkcije raspodele

$$G(t) = cF(t), \quad (3.39)$$

uz pretpostavku da je kupovina (prihvatanje) servisa/proizvoda *Bernoulli*-jev proces, pri čemu je  $c$  verovatnoća potencijalne kupovine, a  $M$  posmatrana populacija [37].

*Srinivasan* i *Mason* [65] predložili su NLS proceduru za određivanje parametara *Bass*-ovog modela koja se odnosi na minimiziranje sume kvadrata reziduala  $u_t$ , pri čemu je [37]

$$N_t - N_{t-1} = m(F(t) - F(t-1)) + u_t. \quad (3.40)$$

Algebarska procedura za određivanje parametara  $p$ ,  $q$  i  $m$  [66], bazirana je na proceni pojavljivanja prevojne tačke određene relacijama (24)-(26). Ukoliko su unapred određeni  $N^*$  i  $s^*$ , na osnovu sledećih relacija moguće je izračunati parametre  $p$  i  $q$

$$p = \frac{s^*(m - 2N^*)}{(m - N^*)^2}, \quad (3.41)$$

$$q = \frac{m \cdot s^*}{(m - N^*)^2}. \quad (3.42)$$

Ukoliko je unapred određen i trenutak pojave prevojne tačke  $t^*$ , nekom od numeričkih metoda moguće je odrediti i parametar  $m$  na osnovu relacije [37]

$$t^* = \frac{m - N^*}{2s^*} \ln \frac{m}{m - 2N^*}. \quad (3.43)$$

#### 3.4.4.4 Određivanje parametara Bass-ovog modela pre uvođenja novog servisa/proizvoda na tržište

Osnovna karakteristika prognoziranja novih servisa/proizvoda je nepostojanje statističkih podataka, tako da je potrebne parametre moguće pretpostaviti na osnovu metoda istraživanja tržišta (anketa, Delfi metoda i sl.), komparativnim pristupom, ili analogijom sa nekim drugim servisom ili proizvodom za koje su ovi parametri poznati. Pri tome treba imati u vidu da servisi/proizvodi iz iste kategorije teže da imaju slične parametre inovacije, dok parametar imitacije najčešće varira [37].

Pristup određivanju parametara, koji se temelji na analogiji sa sličnim servisom/proizvodom obuhvata [37]:

- identifikaciju sličnog servisa/proizvoda gde postoji približno isti proces difuzije;
- identifikaciju servisa/proizvoda koji ne moraju biti slični, ali prate približno isti proces difuzije;
- utvrđivanje vrednosti parametara  $p$  i  $q$  odabranog servisa/proizvoda (procena  $m$  se vrši potpuno nezavisno);
- formiranje Bass-ovog modela za novi servis/proizvod, na osnovu određenih parametara;
- prognoziranje novog servisa/proizvoda na osnovu procesa difuzije.

Osnovni problem u predloženoj proceduri je odabir odgovarajućeg servisa/proizvoda. Za to su razvijene neke formalne metode, ali se zahteva velika

opreznost i kreativnost prilikom odabira analogijskog servisa/proizvoda. Analogija, zasnovana na sličnostima u očekivanom ponašanju na tržištu, pokazala se kao bolje rešenje od one koja se zasniva na sličnostima samih servisa/proizvoda. Na primer, prilikom prognožiranja difuzije *on-line* servisa, bolje je upotrebiti parametre za servis mobilne telefonije, nego za servis kablovske televizije.

Pri odabiru analogijskog ili sličnog servisa/proizvoda uzima se u obzir sledećih pet karakteristika [53]:

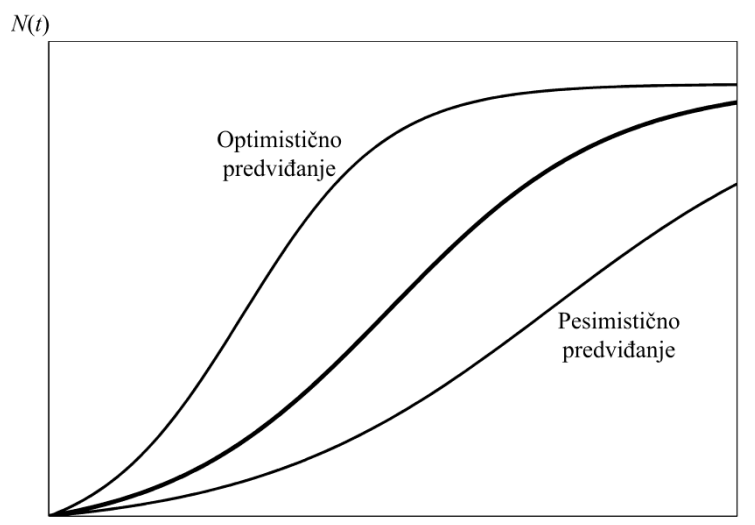
1. kontekst okoline (npr. socio-ekonomski faktori),
2. struktura tržišta (veličina tržišta, broj konkurenata),
3. ponašanje korisnika (situacije u kojima kupuju),
4. marketinška strategija firme i
5. karakteristika novog servisa/proizvoda (npr. relativna prednost tog servisa/proizvoda u odnosu na postojeće).

U Tabeli 3, prikazane su ustanovljene vrednosti za parametre inovacije i imitacije karakterističnih servisa/proizvoda.

Tabela 3. Ustanovljene vrednosti parametara  $p$  i  $q$  Bass-ovog modela za karakteristične servise/proizvode [37]

Servis/proizvod	Period analize	Parametar inovacije $p$	Parametar imitacije $q$
Kolor televizija	1965-1975	0,058	0,168
Kablovska televizija	1981-1991	0,080	0,167
CD plejeri	1986-1996	0,055	0,378
Personalni računari	1982-1988	0,121	0,281
Mobilna telefonija	1986-1996	0,008	0,421
Telefonske sekretarice	1984-1994	0,019	0,481
Bežični telefoni	1984-1994	0,000	0,438

Različite vrednosti parametara inovacije i imitacije se u značajnoj meri odražavaju na krajnji rezultat procesa prognožiranja, tako da se prognoza može prikazati u formi pesimističkog i optimističkog scenarija prihvatanja posmatranog novog servisa/proizvoda na tržištu (Slika 30).



Slika 30. Trendovi pesimističkog i optimističkog scenarija razvoja [37]

Na konačan izgled prognoziranog scenarija razvoja utiče i potencijal tržišta. Osnovni Bass-ov model predviđa konstantan potencijal tržišta tokom celokupnog životnog ciklusa posmatranog servisa/proizvoda.

#### 3.4.4.5 Kritična masa difuzije novih servisa/proizvoda

U oblasti marketinga, kritična masa je definisana kao tačka posle koje proces difuzije postaje samoodrživ [57]. U ovom kontekstu, postizanje kritične mase je usko povezano sa mrežnim efektom, koji se odnosi na difuziju novih tehnologija [59]. Uspeh nekog novog servisa/proizvoda na tržištu obično ne zavisi od broja inovatora, ali se može proceniti u zavisnosti od brzine dostizanja tzv. kritične mase broja korisnika [37].

Kada se kritična masa dostigne, nastaje daleko brži rast prihvatanja posmatranog servisa/proizvoda, sa obzirom da se proces difuzije nastavlja u daleko širem okruženju u odnosu na rane inovatore. Naravno, svi naponi u smislu marketinške kampanje treba da budu usmereni ka što bržem dostizanju kritične mase korisnika. Takođe, prihvatljive cene ili čak pružanje besplatnih usluga neko vreme, mogu pomoći bržem promovisanju novih servisa/proizvoda [67].

Dostizanje kritične mase obično se očekuje na intervalu, gde 10-20% tržišta prihvati novi servis/proizvod ( $0,1 < F(t) < 0,2$ ) [68]. Trenutak dostizanja kritične mase, eksplicitno se može odrediti na osnovu izraza [69]

$$t_c = \frac{\ln \frac{(2 + \sqrt{3})p}{q}}{-(p + q)}, \quad (3.44)$$

i predstavlja vreme kada funkcija brzine difuzije (drugi izvod funkcije prihvatanja servisa/proizvoda) dostiže svoj maksimum. Vreme dostizanja kritične mase zavisi isključivo od procenjenih parametara inovacije i imitacije. U slučaju kada je  $q \leq 3,73p$  kritična masa se dostiže pre uvođenja novog servisa/proizvoda na tržište [37].

### **3.4.5 Primena Bass-ovog difuzionog modela u slučaju prognoziranja saobraćajnih zahteva širokopojasnog saobraćaja rezidencijalnog sektora u Republici Srbiji**

U ovom poglavlju biće prikazana primena Bass-ovog difuzionog modela u slučaju prognoziranja kumulativnog broja rezidencijalnih korisnika usluga širokopojasnih usluga, kao i prognoziranja saobraćajnih zahteva<sup>7</sup> širokopojasnog saobraćaja rezidencijalnog sektora u Republici Srbiji.

Za ulazne podatke iskorišćeni su statistički podaci Regulatornog tela za elektronske komunikacije i poštanske usluge Republike Srbije (RATEL) [70-72], koji se odnose na raspodelu broja pretplatnika prema načinu pristupa, odnosno prema pristupnoj tehnologiji. Od pristupnih tehnologija, uzete su u obzir: 1) ADSL/VDSL, 2) HFC/DOCSIS, 3) WiFi, 4) FTTx 4) ostale pristupne tehnologije (Tabela 4)

---

<sup>7</sup> Poglavlje 4.1.2

Tabela 4. Broj rezidencijalnih korisnika širokopojsnih usluga u periodu (2004-2015)

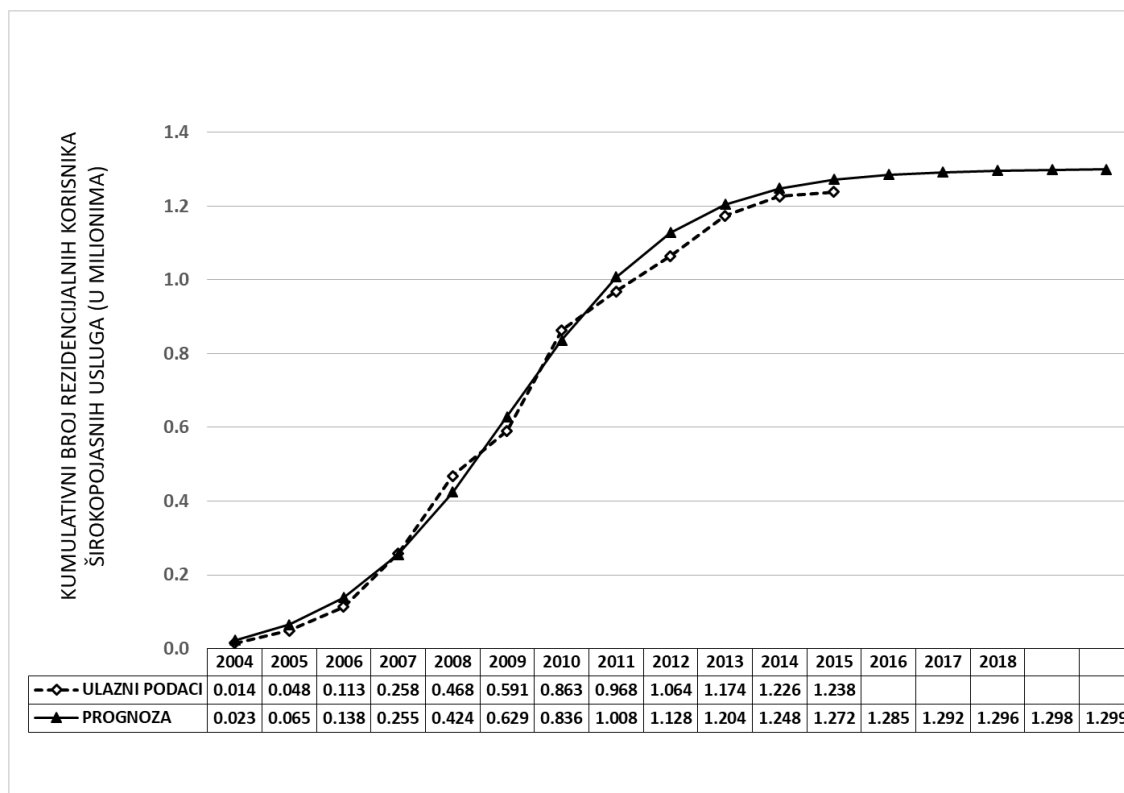
Tehnologija /godina	ADSL	HFC	FWB	OTHER	FTTx*	Ukupno
2004	0	8372	0	6117	0	14489
2005	9530	23956	1049	13914	0	48449
2006	26126	54958	21968	10210	0	113262
2007	132359	87731	36059	2276	0	258425
2008	267876	151154	48130	1135	0	468295
2009	351252	187923	45864	5547	0	590586
2010	536796	260474	58305	7783	0	863358
2011	623611	285413	53754	3573	2096	968447
2012	659878	331281	62013	3021	7784	1063977
2013	693645	375328	79878	13260	11524	1173635
2014	715845	410821	83643	2103	13778	1226190
2015	724162	475968	8757	3253	25744	1237884

\* Podaci za FTTx se nisu prikupljali pre 2011. godine

Navedeni ulazni podaci su iskorišćeni za primenu Bass-ovog difuzionog modela sa ciljem da se izvrši prognoza kumulativnog broja rezidencijalnih korisnika širokopojsnih usluga za period od 2016. do 2020. godine, na način, prikazan u narednom delu teksta.

Parametri Bass-ovog modela ( $p$ ,  $q$  i  $m$ ), dobijeni su primenom regresione metode, prikazana formulama (3.32)-(3.35), nad kojima je, nadalje izvršeno dodatno fitovanje. Primenjenim metodom su dobijene sledeće vrednosti navedenih parametara:  $p=0.013$ ,  $q=0.63$  i  $m=1.3$  (izraženo u milionima). Dobijeni parametri su nadalje iskorišćeni za dobijanje kumulativnog broja korisnika, upotrebom formule (3.21). Dobijeni prognozirani podaci, zajedno sa ulaznim podacima, prikazani su na Slici 31.





Slika 31. Ulazni i prognozirani kumulativni broj rezidencijalnih korisnika širokopojsnih usluga za period od 2004. do 2020. godine [73]

Da bi se utvrdila preciznost prognoziranih rezultata dobijenih navedenom metodom, sprovedena su tri testa: MAE (Mean Absolute Error) [74], MAPE (Mean Absolute Percentage Error) [75], kao i Durbin-Watson test [76].

Za utvrđivanje devijacije dobijenih podataka, provedeni su MAE i MAPE testovi, u kojima manje vrednosti MAE i MAPE parametara ukazuju na bolje slaganje ulaznih i prognoziranih podataka. Pored toga, vrednost MAPE parametra može biti procenjena primenom Lewis-ove skale [75] za procenu tačnosti prognoziranih vrednosti, prikazanih u Tabeli 5.

Tabela 5. Lewis-ova skala za procenu tačnosti prognoziranih vrednosti [75]

MAPE	Tačnost procene prognoziranih podataka
Manje od 10%	Visoka
11% - 20%	Dobra
21% - 50%	Razumna
51% i više	Neprecizna

Za proveru prisustva sistematskih grešaka, sproveden je Durbin-Watson test [76], u kojem se koriste sledeće formule:

$$DW = 2 - 2 \frac{w}{v}, \quad (3.45)$$

gde se parametri  $w$  i  $v$ , mogu dobiti primenom sledećih formula:

$$w = \sum_{t=1}^{n-1} (F(t) - \hat{F}(t))(F(t+1) - \hat{F}(t+1)), \quad (3.46)$$

$$v = \sum_{t=1}^n (F(t) - \hat{F}(t))^2. \quad (3.47)$$

Vrednosti Durbin-Watson (DW) testa mogu se kretati u opsegu (0 – 4), pri čemu vrednosti iz opsega (1,5 – 2,5) ukazuju na odsustvo autokorelacije prvog reda, gde je najpovoljnija vrednost 2.

Na osnovu primene navedenih testova, dobijene su vrednosti parametara, prikazane u Tabeli 6.

Tabela 6. Rezultati provere prognoziranih vrednosti

Test	Rezultati provere
MAE	0.029
MAPE (%)	12.702
DW	1.53846

Rezultat primene MAPE testa, sa niskom vrednosti parametra ukazuju na dobru tačnost prognoziranih podataka, što je takođe potvrđeno i rezultatom MAE testa (takođe niska vrednost). Rezultat primene DW testa je pokazao odsustvo autokorelacije prvog reda, ukazujući time na odsustvo sistematskih grešaka.

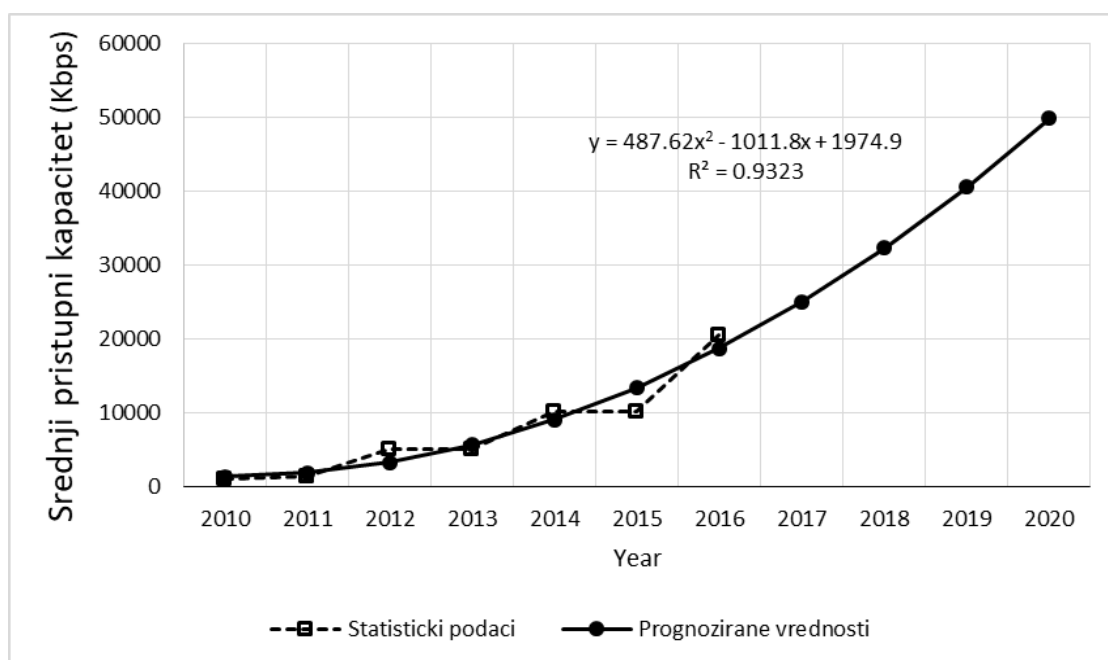
Na osnovu prognoziranih vrednosti kumulativnog broja rezidencijalnih korisnika širokopojsnih usluga, primenom metode [77], [78], sprovedeno je prognoziranje saobraćajnih zahteva rezidencijalnog sektora, upotrebom sledeće formule:

$$y_t = N(t) \cdot C(t) \cdot A(t) \cdot b(t) \cdot uc(t) \cdot HP(t), \quad (3.48)$$

gde je  $N(t)$  – potencijal tržišta;  $C(t)$  – srednji pristupni kapacitet, u Mb/s, u godini  $t$ ;  $A(t)$  – srednja iskorišćenost pristupnih kapaciteta (%) u godini  $t$ ,  $b(t)$  – faktor koncentracije saobraćaja sa komutacijom kola u godini  $t$ ,  $uc(t)$  – faktor koncentracije saobraćaja sa komutacijom paketa u godini  $t$  i  $HP(t)$  – penetracija broja domaćinstava (%) u godini  $t$ .

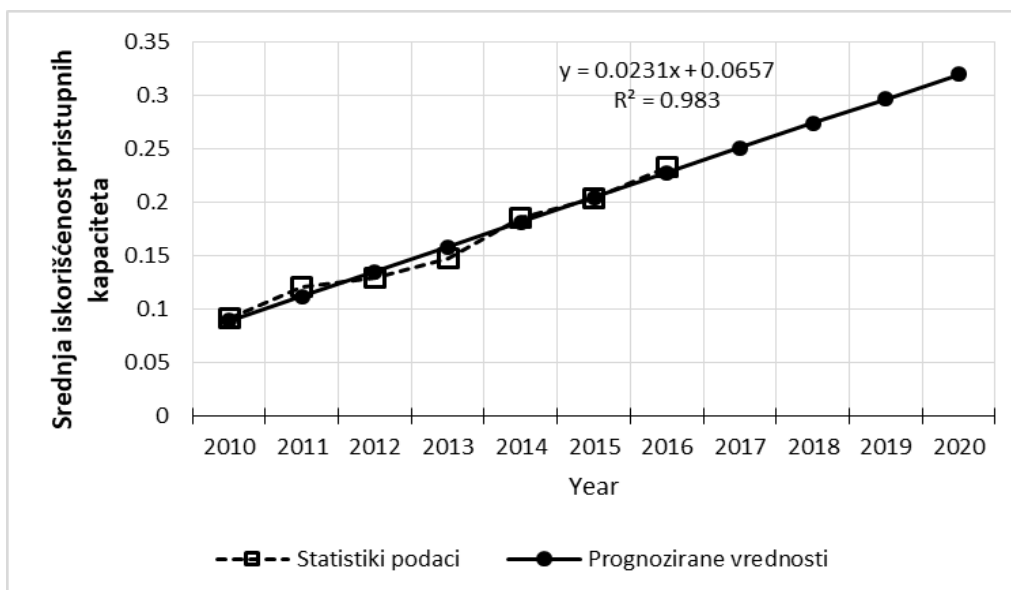
Vrednosti navedenih parametara su takođe dobijene na osnovu statističkih podataka RATEL-a [70-72]. Utvrđeno je da se prognozirane vrednosti navedenih parametara ponašaju, na osnovu prikupljenih podataka, na sledeći način:

- prognozirane vrednosti srednjeg pristupnog kapaciteta,  $C(t)$  imaju polinomijalni rast, u budućem periodu, sa pravilnošću  $C(t) = 487.62t^2 - 1011.8t + 1974.9$ ,  $R^2 = 0.9323$  (Slika 32);



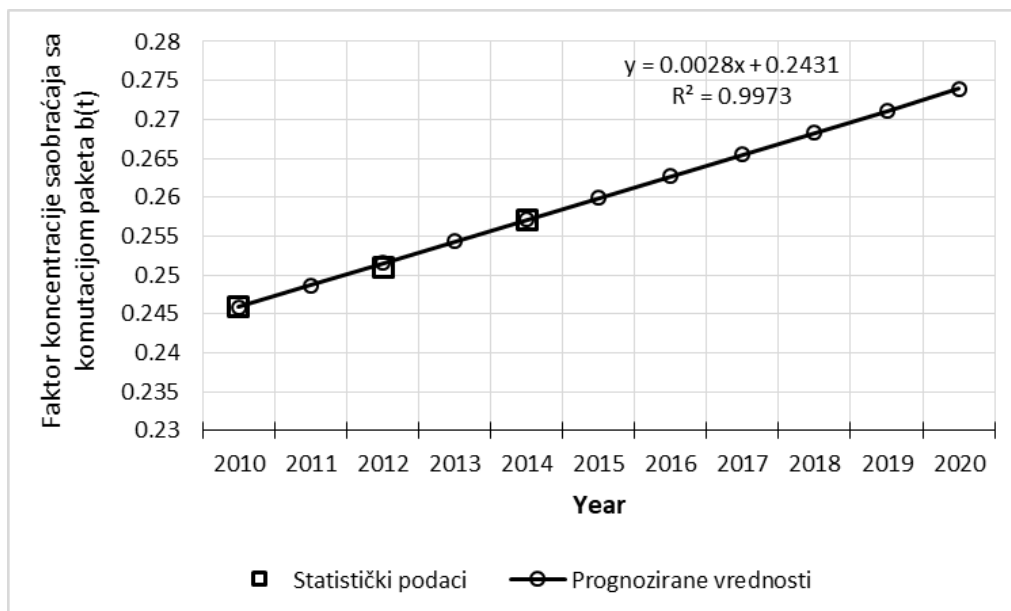
Slika 32. Srednji pristupni kapacitet - statistički podaci i prognozirane vrednost [73]

- prognozirane vrednosti iskorišćenosti pristupnih kapaciteta,  $A(t)$  imaju linearni rast, u budućem periodu, sa pravilnošću  $A(t) = 0.0231t + 0.0657$ ,  $R^2 = 0.983$  (Slika 33);



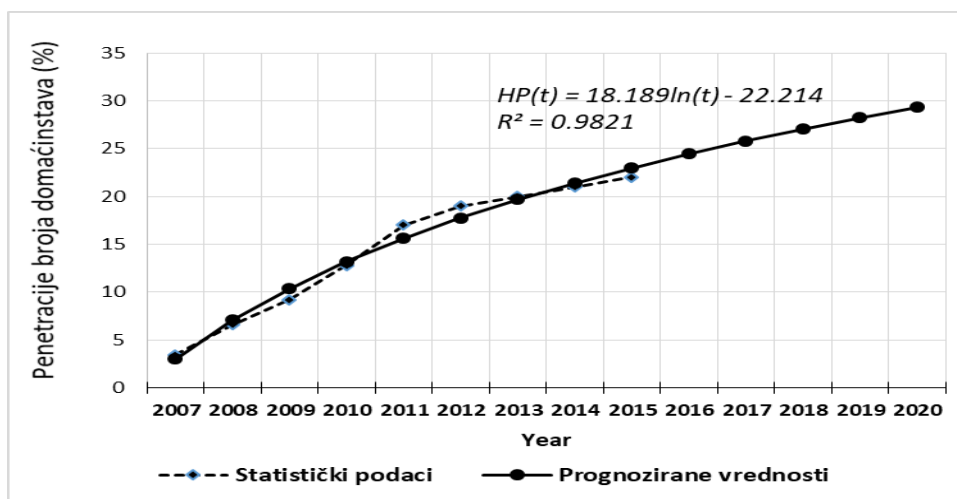
Slika 33. Srednja iskorišćenost pristupnih kapaciteta - statistički podaci i prognozirane vrednosti [73]

- uvidom u statističke podatke, utvrđeno je da faktor koncentracije saobraćaja sa komutacijom paketa ima skoro konstantnu vrednost  $u(t)=u=0.78$ ;
- prognozirane vrednosti faktora koncentracije saobraćaja sa komutacijom kola,  $b(t)$ , imaju linearni rast, u budućem periodu, sa pravilnošću  $b(t) = 0.0028t + 0.2431$ ,  $R^2 = 0.9973$ , (Slika 34);



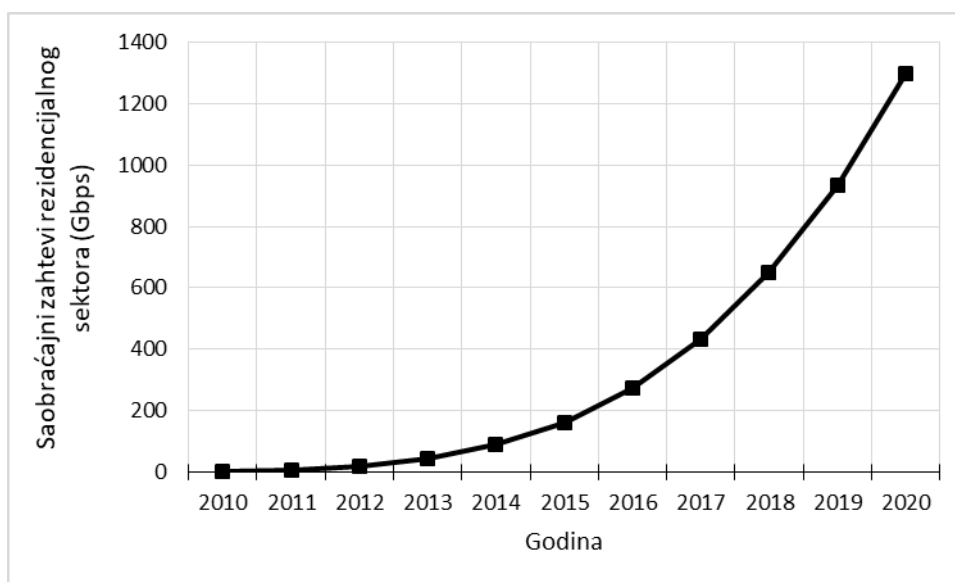
Slika 34. Faktor komutacije saobraćaja sa komutacijom kola - statistički podaci i prognozirane vrednosti [73]

- prognozirane vrednosti penetracije broja domaćinstava,  $HP(t)$ , imaju logaritamski rast, u budućem periodu, sa pravilnošću  $HP(t) = 18.189\ln(t) - 22.214$ ,  $R^2 = 0.9821$ , (Slika 35). Ova vrednost ne bi trebalo da bude veća od referentne  $g$  vrednosti IDI indeksa (ICT Development Index, International Telecommunication Union, 2012).



Slika 35. Procenat penetracije broja domaćinstava - statistički podaci i prognozirane vrednosti [73]

Na osnovu utvrđenih procena, primenom formule (3.48), dobijene su prognozirane vrednosti saobraćajnih zahteva rezidencijalnog sektora (u Gb/s, Slika 36).



Slika 36. Prognozirane vrednosti saobraćajnih zahteva rezidencijalnog sektora [73]

## 4 KARAKTERIZACIJA I MERENJE SAOBRAĆAJA

Među osnovnim i najvažnijim aktivnostima u procesu planiranja saobraćaja, nalaze se i aktivnosti vezane za karakterizaciju saobraćaja, merenje, prognoziranje, kao i dimenzionisanje resursa mreže. Razumevanje informacija o saobraćaju, koji se realizuje u okviru posmatrane mreže, važno je ne samo za planiranje mreže, već i za operativne poslove, mrežnu bezbednost, forenzičke poslove i sl. Karakterizacija saobraćaja se odnosi na fenomenološki opis saobraćaja, tj. na analizu podataka dobijenih merenjem, kao i izradu statističkih opisa (profila). Merenje saobraćaja može pružiti bitne podatke, ne samo sa tehničkog aspekta, već i sa tehnno-ekonomskog, u procesu razumevanja biznis okruženja i pronalaženja novih i efikasnijih vidova poslovanja, poput [79]. Rezultati merenja su neophodni za dobijanje prognoziranih vrednosti saobraćaja, od čijeg kvaliteta zavisi i kvalitet dimenzionisanja posmatrane mreže, čiji je cilj da uravnoteži tehničke parametre planiranog sistema sa sagledanim zahtevima u pogledu pružanja servisa, kao i sa utvrđenim ekonomskim ograničenjima.

### 4.1 Karakterizacija mrežnog saobraćaja

#### 4.1.1 Mrežna topologija – uvodni pojmovi

Telekomunikaciona mreža, koja predstavlja predmet različitih modela i pristupa, koji su vezani za proces planiranja, može se uopšteno predstaviti grafom  $G(N,L)$ , gde  $N$  predstavlja skup svih čvorova, a  $L$  skup svih pripadajućih linkova koji povezuju čvorove iz skupa  $N$ . Svaki link  $l \in L$  može se okarakterisati kao *unidirekcioni*, ukoliko predstavlja vezu između izvorišnog čvora  $a(l)$  i destinacionog čvora  $b(l)$ , pri čemu oba navedena čvora pripadaju skupu  $N$ . Imajući ovo u vidu, za čvor  $n \in N$  može se reći da pripada skupu izvorišnih čvorova  $\delta^+(n)$ , ukoliko važi  $\delta^+(n) = \{l \in L : a(l) = n\}$ , odnosno da pripada skupu destinacionih čvorova  $\delta^-(n)$ , ukoliko važi da  $\delta^-(n) = \{l \in L : b(l) = n\}$  [80]. Putanja duž posmatrane mreže  $p$  može se predstaviti kao sekvenca, koja se sastoji od niza sukcesivnih linkova  $l_i$ ,  $p=(l_1, l_2, \dots, l_k)$ , takva da destinacioni čvor linka  $l_i$ , predstavlja izvorišni čvor linka  $l_{i+1}$ . Shodno navedenom, može se reći da je posmatrana putanja  $p$  je oivičena izvorišnim čvorom  $a(p)$  i destinacionim čvorom  $b(p)$  [80].

### 4.1.2 Pojam saobraćajnog zahteva

Saobraćaj, koji treba da se realizuje na jednoj mreži, može se predstaviti kao skup saobraćajnih zahteva  $D$ , pri čemu svaki zahtev  $d \in D$  reprezentuje saobraćajni tok, kome izvoriste može biti jedan ili više čvorova  $a(d)$ , a destinaciju može predstavljati jedan ili više čvorova  $b(d)$ . Treba napomenuti da jedan čvor ne može istovremeno predstavljati i izvoriste i destinaciju za jedan isti saobraćajni zahtev. Posmatrani saobraćajni zahtev  $d$  može se okarakterisati intenzitetom  $h_d$ , (na primer, u bit/s) [80]. Imajući navedeno u vidu, saobraćaj koji je sačinjen od skupa saobraćajnih zahteva  $d$ , može se predstaviti u formi vektora  $h$ , gde je  $h = \{h_d, d \in D\}$ . Treba napomenuti da postoji odgovarajuća razlika u značenju intenziteta toka  $h_d$ , u slučaju mreža sa komutacijom kola, sa jedne strane i mreža sa komutacijom paketa, sa druge [80].

U slučaju mreža sa komutacijom kola, zahtev  $d$  se može predstaviti kao niz ponuđenih zahteva za uspostavljanje (realizaciju) veze, sa prosečnim brojem slučajnih nailazaka  $\lambda_d$  u jedinici vremena (intenzitet nailazaka zahteva). Za svaku vezu, koja biva uspostavljena, može se reći da opslužuje korespondentni ponuđeni zahtev sa prosečnim vremenom  $\mu_d^{-1}$  (koje predstavlja vreme zauzeća). To znači da ponuđeni saobraćaj  $A_d$  može da se definiše kao prosečan broj ponuđenih zahteva, koji nastaju u toku srednjeg trajanja zauzeća posmatranog broja veza, odnosno  $A_d = \lambda_d / \mu_d$ . Ponuđeni saobraćaj se opslužuje pomoću grupe linkova, čime se zauzima deterministički kapacitet  $s_d$ . U slučaju kada su svi posmatrani zahtevi istog tipa, onda oni zauzimaju isti deterministički kapacitet (obično  $s_d = 1, \forall d$ ), pa se takav saobraćaj može okvalifikovati kao jednoservisni (single-class). Suprotan slučaj podrazumeva da, na mreži, postoje zahtevi različitog tipa, koji tada zauzimaju različite determinističke kapacitete  $s_d$ , pa se takav saobraćaj može okvalifikovati kao multiservisni (*multi-class*). U oba navedena slučaja, prosečan intenzitet saobraćaja, koji je generisan zahtevom  $d$ , može se predstaviti izrazom [80]:

$$h_d = s_d A_d = s_d \frac{\lambda_d}{\mu_d} \quad (4.1)$$

U mrežama sa komutacijom kola, linkovi  $l$  imaju diskretan skup vrednosti kapaciteta (modularne kapacitete), koji se uobičajeno formulišu kroz broj istovremenih

veza koji se na njima mogu realizovati, pa se prosečan intenzitet saobraćaja  $h_d$ , kao i kapacitet linka  $u_l$ , izražava u jedinici *Erlang*<sup>8</sup> (E, Erl.), koja ima bezdimenzionalan karakter [80].

Sa druge strane, u slučaju mreža sa komutacijom paketa, pojam zahteva odgovara paketskom toku koji je okarakterisan kroz *prosečan* intenzitet (izražen brojem paketa ili bita po sekundi). Ovo proističe iz činjenice da trenutni saobraćaj, koji je generisan od nekog izvora, može svojim intenzitetom fluktuirati na brz i slučajan način, oko njegove prosečne vrednosti, zahvaljujući stohastičkoj prirodi vremenskih intervala između nailazaka paketa. Sa druge strane, slučaj pojave određenog niza paketa sa frekvencijom nailazaka iznad prosečne vrednosti i u kratkotrajnom vremenskom intervalu proizvodi tzv. *burst* efekat. Tada se maksimalna vrednost nivoa saobraćaja, u posmatranom trenutku, naziva *vršni* intenzitet saobraćaja (*peak rate*). U situaciji, kada određeni izvorišni čvor generiše pakete koji se prenose kroz grupu posmatranih linkova, tada se *efektivni* kapacitet posmatranog izvora saobraćaja (*effective bandwidth*), čija se vrednost nalazi u granicama između *prosečnog* i *vršnog* intenziteta, može definisati kao deo kapaciteta svakog od posmatranih linkova, neophodan za slanje paketa sa intenzitetom saobraćaja koji odgovara posmatranom pragu QoS [80]. Ukoliko intenzitet  $h_d$  posmatranog toka  $d$  predstavlja meru njegovog *efektivnog* kapaciteta, tada dizajn mreže treba da osigurava da zbir *efektivnih* kapaciteta tokova, koji se pojavljuju na ulaznom čvoru posmatranog linka bude manji od njegovog fizičkog kapaciteta. Ukoliko intenzitet  $h_d$  posmatranog toka  $d$  predstavlja meru njegovog *prosečnog* kapaciteta, tada mrežni dizajn obično ograničava maksimalno iskorišćenje posmatranog linka u granicama između 50% i 90%, da bi se mogla garantovati realizacija posmatranog toka sa zahtevanim pragom QoS [80].

Imajući ovo u vidu, razlikuju se tri vrste zahteva [80]:

- *Unicast* (1-1), kada zahtev  $d$  ima jedinstveni izvorišni i destinacioni čvor tj. gde važi da je  $|a(d)|=1$ ,  $|b(d)|=1$ . *Unicast* zahtevi generišu najčešći oblik saobraćaja, koji se, zahvaljujući navedenoj karakteristici, može reprezentovati tzv.

---

<sup>8</sup> Definisana u čast Agner Krarup Erlanga, koji je pružio ogroman doprinos klasičnoj teoriji telokomunikacionog saobraćaja



*saobraćajnom matricom* (poglavlje 4.3.1). Saobraćaj, generisan od strane *unicast* zahteva (nadalje, *unicast* saobraćaj), realizuje (rutira) se preko jedne ili više putanja (gde se svaka putanja sastoji od grupe pripadajućih linkova), pri čemu svaka putanja ima isti izvorišni i destinacioni čvor. Za *unicast* saobraćaj, koji je realizovan preko više putanja, može se reći da je *balansiran*, pri čemu duž posmatranih putanja saobraćaj ne mora biti transportovan u istom obimu.

- *Anycast* ( $j$ - $k$ ), kada zahtev  $d$  može generisati saobraćaj u jednom ili više izvorišnih čvorova, koji pripadaju grupi  $j$ , ( $|a(d)| = j$ ), a koji je usmeren ka jednom ili više destinacionih čvorova, koji pripadaju grupi  $k$ , ( $|b(d)| = k$ ). *Anycast* zahtevi se, u praksi, često javljaju u slučaju realizacije saobraćaja tipa *klijent – cloud* ili *cloud-cloud*. Saobraćaj, generisan od strane *anycast* zahteva (nadalje, *anycast* saobraćaj), realizuje se preko jedne ili više putanja gde svaka putanja ima izvorišni čvor koji pripada grupi  $j$ , kao i destinacioni čvor koji pripada grupi  $k$ .
- *Multicast* ( $1$ - $k$ ), kada zahtev  $d$  može da generiše saobraćaj u jednom izvorišnom čvoru, ( $|a(d)| = 1$ ), na takav način da se  $k$  istovetnih kopija posmatranog zahteva istovremeno upućuje ka  $k$  različitih destinacionih čvorova, ( $|b(d)| = k$ ), za razliku od *anycast* saobraćaja, koji je vezan za jedan zahtev. Poseban slučaj *multicast* zahteva predstavlja tzv. *Broadcast* zahtev, koji generiše saobraćaj na takav način da se formira  $N-1$  kopija posmatranog zahteva, koji se upućuju ka svim čvorovima na posmatranoj mreži osim izvorišnog ( $b(d) = N - a(d)$ ). Saobraćaj generisan od strane *multicast* zahteva (nadalje, *multicast* saobraćaj), realizuje se preko jedne ili više grupa čvorova koji formiraju tzv. *multicast pripadajuće drvo* (multicast tree) i gde svako *multicast pripadajuće drvo* ima jedan izvorišni čvor, koji pripada grupi  $j$ , kao i  $k$  destinacionih čvorova, koji pripadaju grupi  $k$ .

### 4.1.3 Karakterizacija saobraćaja i QoS

Servisi koji se pojavljuju u mrežama sa paketskom komutacijom razlikuju se prema trajanju zahteva i stepenu kompleksnosti, od jednostavnih poput SMS poruka

(gde se jedna poruka realizuje u okviru jedne sesije), do kompleksnih poput multimedijalnih servisa (gde se usluga realizuje kroz veći broj dugotrajnih sesija i paralelnih tokova). Imajući u vidu prikazanu hijerarhiju, karakteristike zahteva, sesija i tokova su od ključne važnosti za prva tri sloja, gde treba dimenzionisati resurse čiji rad zavisi od posmatrane mreže, poput IP multimedijalnih podсистema (IMS), (Prilog 1. Tabela 1), dok su karakteristike vezane za 4. sloj (nivo paketa i bita), bitne za dimenzionisanje elemenata same mreže (poput kapaciteta rutera), dimenzionisanja pojedinih ruta, kao i samih linkova). Pored navedenog, između prva tri sloja sa jedne strane i četvrtog sa druge, postoje razlike u vremenskom domenu. Naime, raspodela slučajnih intervala između uzastopnih zahteva, sesija i tokova na prva tri sloja, najčešće je jedna od nezavisnih raspodela poasonovskog tipa, pošto je rezultat slučajnih (ili kvazislučajnih) korisničkih odluka. Sa druge strane, na četvrtom sloju grupe paketa se generišu u *burst*-ovima, upotrebom protokola i mehanizmima za deljenje propusnog opsega-a, pa se u ovom slučaju, primenjuju drugačije vrste raspodela slučajnih intervala između uzastopnih paketa [25].

Nivo saobraćajnih tokova u mreži zavisi od vrste sadržaja, kao i različitih zahteva u pogledu kvaliteta usluge (*QoS*). Naime, određeni tipovi usluga, poput multimedijalnih (na primer, video na zahtev ili audio striming) su osetljivi na kašnjenje paketa, za razliku od usluga prenosa datoteka, na primer. Imajući u vidu mogućnost zagušenja saobraćaja, javlja se potreba da dobavljač (provajder) usluga može garantovati korisniku odgovarajući kvalitet za određene tipove usluga. Ugovorna obaveza između provajdera i korisnika usluge (*SLA*), definiše model koji u tehničkom smislu predstavlja skup pravila o dolasku, vremenu zadržavanja i korelacijama između paketa. Primenom posmatranog modela realizuje se korespondentni tip usluge, sa ugovorenim nivoom kvaliteta. Na ovaj način se posmatrani tipovi saobraćaja karakterišu, a pravila karakterizacije realizuju na nivou mrežnih resursa.

Karakterizacija saobraćaja vrši se na osnovu sledećih parametara [25]:

- **Nivo izgubljenih paketa** - izgubljenim paketima u mreži, se smatraju oni paketi, koji su izgubljeni na mrežnoj ruti, od izvora ka destinaciji. Gubitak može biti neplaniran (usled problema nastalog prilikom prenosa) ili planski (u slučaju

veza koje nisu konekciono orjentisane), kada se odgovarajući broj paketa namerno odbacuje, kako bi se izbegla zagušenja.

- **Kašnjenje paketa (delay)** - vreme koje je potrebno da paket stigne od izvora do odredišta, a koje se sastoji iz fiksnog kašnjenja (kodiranje, dekodiranje i propagaciono kašnjenje) i promenljivog kašnjenja (zagušenja i boravak paketa u baferu). Nivo kašnjenja paketa zavisi od trenutnog stanja na mreži, može uticati na kvalitet posmatranog servisa, zavisno od toga da li je korespondentna aplikacija osetljiva na ovu pojavu ili ne.
- **Varijacija kašnjenja (jitter)** – razlika u kašnjenju paketa. Ovaj efekat je veoma važan za multimedijalne servise kao što su *VoIP*, *VoD* ili *IPTV*, koji su veoma osetljivi na razlike u kašnjenju paketa, koje rezultuju degradacijom kvaliteta zvuka i slike.
- **Redosled isporuke paketa** - paketi koji se šalju, po pravilu, prosleđuju se različitim rutama do destinacije, što utiče na vreme pristizanja, a samim tim i na efikasnost reasembliranja poruke.
- **Verovatnoća (stepen) bitske greške (*Bit Error Rate, BER*)** – razlika u sadržaju paketa na nivou bita u tački prijema, u odnosu na sadržaj u trenutku slanja. Osetljivost različitih aplikacija na *BER* varira u zavisnosti od toga koliki je njen dozvoljeni nivo, da bi aplikacija bila razumljiva.

Kombinujući osobine saobraćajnih tokova i vrstu *QoS* ograničenja, preporučene su tri glavne klase saobraćaja za modelovanje na nivou mreže [25]:

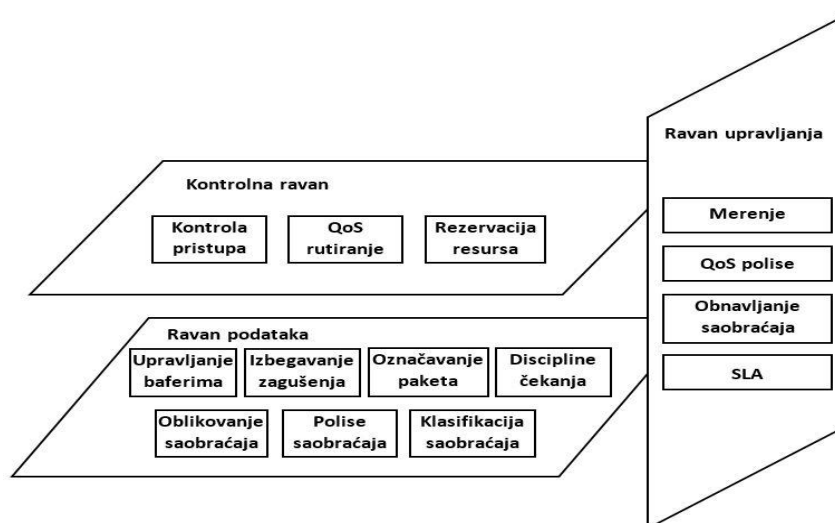
- **klasa 1 - *QoS* konstantni strim:** prenos podataka fiksnom brzinom sa definisanim nivoom i varijacijom kašnjenja (na primer, zakupljene linije, distribucija video materijala i sl.)
- **klasa 2 - *QoS* varijabilni strim:** prenos podataka sa promenljivom brzinom izvedenom iz korisničke informacije i algoritma za kodiranje koji zahteva garantovani kvalitet i definisan nivo kašnjenja, kao varijacije kašnjenja paketa (na primer, video striming, audio striming, VoIP i sl.)

- **klasa 3 - QoS elastični tip:** prenos podataka sa promenljivom brzinom bez ograničenja u pogledu kašnjenja i varijacije kašnjenja sa asinhronim tipom isporuke (na primer, pregledanje web sadržaja, prenos datoteka, e-mail i sl.)

Svakoj od navedenih klasa može biti pridružen poseban model za potrebe agregacije servisa iste klase. Na taj način se olakšava formiranje saobraćajnih matrica i dimenzionisanje mrežnih resursa u skladu sa definisanim performansama. Modeli saobraćaja tipa Erlang-Multirate [81] su pogodni za upotrebu, u slučaju QoS klasa 1 i 2, dok su modeli, poput *Generalised Processor Sharing (GPS)* [82], [83] pogodni za upotrebu, u slučaju QoS klase 3 [25].

U ITU preporuci Y.1291 [84], predložen je koncept arhitekture kvaliteta servisa u paketski orjentisanim mrežama, na bazi Internet protokola. Predložena arhitektura je koncipirana u tri osnovne ravni (Slika 37):

- **Kontrolna ravan,** koja sadrži mehanizme koji se odnose na putanje korisničkog saobraćaja. Ovi mehanizmi obuhvataju kontrolu pristupa, QoS rutiranje i rezervaciju resursa;
- **Ravan podataka,** koja sadrži mehanizme koji se neposredno primenjuju na korisnički saobraćaj. To uključuje upravljanje baferima, sprečavanje zagušenja, označavanje paketa, primena disciplina čekanja u redu, primenu polisi saobraćaja, klasifikaciju saobraćaja i uobličavanje saobraćaja.
- **Ravan upravljanja,** koja sadrži mehanizme koji se odnose na operativne, administrativne i upravljačke aspekte funkcionisanja mreže, poput primene SLA polisa, obnavljanje servisa u slučaju otkaza, kao i primenu mehanizama za nadzor rada (monitoring) mreže.



Slika 37. Arhitektura QoS [84]

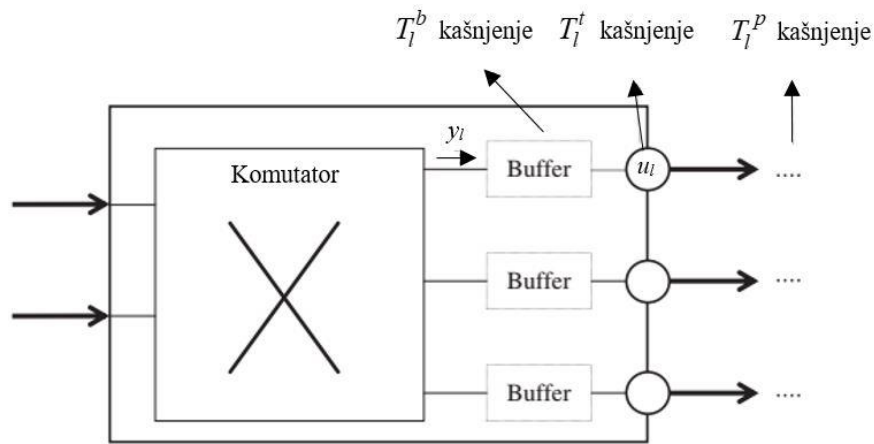
Arhitektura kvaliteta servisa se, u opštem smislu, može podeliti na deklaracije i procedure kvaliteta servisa. Deklaracije kvaliteta servisa predstavljaju statični deo arhitekture i sadrže svojstva kao što su klase servisa, parametri i njihove specifikacije, dok procedure kvaliteta servisa predstavljaju dinamični deo arhitekture kvaliteta servisa i sastoje se od mehanizma puta kontrole i puta podataka.

#### 4.1.4 Pojam kašnjenja u mrežama sa paketskom komutacijom

U mrežama sa paketskom komutacijom saobraćaja, kašnjenje paketa (*delay*) se javlja zahvaljujući stohastičkoj prirodi formiranja saobraćajnih tokova, realizovanih po putanjama, koje uključuju korespondentne linkove, odnosno čvorove na posmatranog mreži. Kašnjenje paketa se može klasifikovati u skladu sa faktorima, koji utiču na pojavu ovog efekta. U narednom delu teksta biće prikazani opšti oblici kašnjenja, koji mogu figurisati u metodama karakterizacije saobraćaja, koje se primenjuju u procesu planiranja.

##### 4.1.4.1 Kašnjenje na nivou mrežnog linka

Za prikaz kašnjenja paketa na nivou posmatranog linka  $l$ , može se primeniti uopšteni model, koji je prikazan na Slici 38 [80]. Predstavljeni model uključuje posmatrani link i jedan od pripadajućih čvorova, kojima je dati link oivičen. Posmatra se grupa paketa, koja se sastoji od paketa pristiglih u čvor i paketa koji su generisani u samom čvoru.



Slika 38. Uopšteni model za procesiranje paketa u mrežnom čvoru [80]

Uopšteni model čvora se sastoji od komutatora, pripadajućih bafera i izlaznih portova. Model podrazumeva da se nad posmatranim paketima vrši proces komutacije, nakon čega se paketi smeštaju u korespondentne bafere odnosno stavljaju u status čekanja pre nego što bivaju upućeni ka odgovarajućim izlaznim portovima. Shodno navedenom, prosečno kašnjenje na nivou posmatranog linka  $l$  ( $T_l$ ) može se predstaviti kao suma prosečnog kašnjenja na nivou bafera ( $T_l^b$ ), prosečnog kašnjenja na nivou transmisije ( $T_l^t$ ) i kašnjenja na nivou propagacije ( $T_l^p$ ), odnosno [80]:

$$T_l = T_l^b + T_l^t + T_l^p \quad (4.2)$$

Prosečno kašnjenje na nivou bafera ( $T_l^b$ ) predstavlja vreme koje posmatrani paket provede u datom baferu i ono zavisi od statističkih karakteristika posmatranog saobraćaja, među kojima, najveći uticaj ima kapacitet posmatranog linka  $l$  ( $u_l$ ), kao i prosečan intenzitet ukupnog ponuđenog saobraćaja na posmatranom linku ( $y_l$ ). Prosečno kašnjenje na nivou transmisije ( $T_l^t$ ) predstavlja vreme koje se računa od trenutka kada paket napusti bafer i uputi ka posmatranom linku. Ovo vreme se predstavlja kao odnos dužine paketa  $PL$  (izraženo u bitima) i kapaciteta posmatranog linka  $u_l$ , relacija (4.3) [80]

$$T_l^t = \frac{PL}{u_l} \quad (4.3)$$

Treći faktor u kašnjenju na nivou mrežnog linka, kašnjenje na nivou propagacije ( $T_l^p$ ), predstavlja vreme potrebno da elektromagnetni signal stigne na drugi kraj posmatranog linka i ono zavisi od fizičke dužine samog linka, kao i od karakteristika medijuma za prenos signala [80].

Procena prosečnog kašnjenja na nivou bafera, podrazumeva upotrebu probabilističkih modela saobraćaja, koji se nadalje mogu koristiti za predviđanje mogućeg ponašanja posmatrane mreže.

#### 4.1.4.1.1 Poasonov saobraćajni model

Poasonov saobraćajni model baziran je na pretpostavci da se paketski saobraćaj, koji je ponuđen posmatranom linku  $l$  u obliku toka, može predstaviti preko vremena između nailazaka paketa. U navedenom slučaju, vreme između nailaska dva uzastopna paketa može se posmatrati kao nezavisni događaj, koji podleže negativnoj eksponencijalnoj raspodeli. Ova pretpostavka je bazirana na Palm-Hinčinovoj teoremi [85] prema kojoj, pod opštim pretpostavkama, multipleksiranje velikog broja izvora nezavisnih vremena nailazaka paketa asimptotski aproksimira Poasonov izvor. Ako se veličina paketa u nailasku, takođe posmatra kao nezavisna veličina, tada se prosečno kašnjenje na nivou bafera, može izraziti preko Polaček-Hinčinove M/G/1 formule [80]:

$$T_l^b = \frac{PL}{u_l} \cdot \frac{\rho_l}{2(1-\rho_l)} (1 + CV_{PL}^2) \quad (4.4)$$

gde  $CV_{PL}$  predstavlja koeficijent varijacije dužine paketa  $PL$ , a  $\rho_l$  predstavlja prosečno iskorišćenje linka  $\rho_l = y_l/u_l$ . Ukoliko se veličina paketa ponaša po eksponencijalnoj raspodeli ( $CV_{PL}^2 = 1$ ), tada se izraz (4.4) može predstaviti u M/M/1 obliku [80]:

$$T_l^b = \frac{PL}{u_l} \cdot \frac{\rho_l}{1-\rho_l} \quad (4.5)$$

#### 4.1.4.1.2 Model sebi-sličnog saobraćaja

Statistička analiza podataka, koji su prikupljeni prilikom merenja saobraćaja u mrežama sa paketskom komutacijom, ukazala je na određene razlike, koje se pojavljuju prilikom poređenja sa rezultatima, koji se mogu dobiti primenom klasičnih, stacionarnih saobraćajnih modela (sa zavisnosti u kratkom vremenskom opsegu). Uočene razlike se

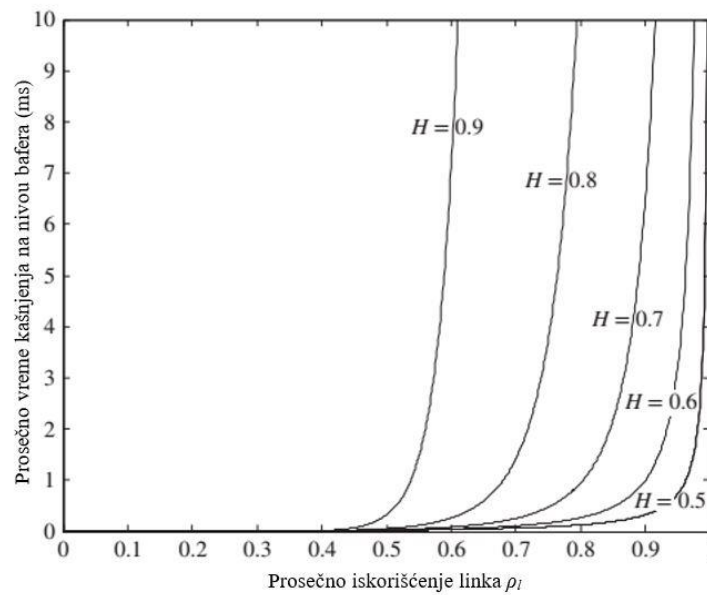
odnose na deo karakteristika paketskog saobraćaja koji je vezan za pojavu *burst* saobraćaja, koji posmatrano u dužem periodu, pokazuje određene vidove pravilnosti pojava tokom vremena [80]. Pravilnost pojave *burst* saobraćaja, nezavisno od dužine posmatranog vremenskog intervala predstavlja osobinu *sebi-sličnosti* (*self-similarity*), koja se matematički može opisati kroz različite modele, kao što su fraktalna ARIMA (*Fractional Autoregressive Integrated Moving Average*, FARIMA), fraktalni Gausov šum (FGN), fraktalno Braunovo kretanje (FBM), diskretno Braunovo kretanje, agregacija ON – OFF izvora visoke varijabilnosti.

U kontekstu određivanja kašnjenja na nivou bafera, kašnjenje  $T_l^b$  može se predstaviti preko modela fraktalnog Braunovog kretanja (FBM) u slučaju beskonačnog reda za čekanje (*infinite queue*) na sledeći način [80]:

$$T_l^b = \frac{PL}{u_l} \cdot \frac{\rho_l^{1/2(1-H)}}{2(1-\rho_l)^{H(1-H)}}, \quad (4.6)$$

gde je sa  $H$  označen tzv. Hurstov parametar  $H \in [0.5, 1)$  koji karakteriše nivo sebi-sličnosti u slučaju posmatranog saobraćaja. Kada se vrednost ovog parametra približava broju jedan, tada je prisustvo sebi-sličnosti sve izraženije. U tom slučaju, prisustvo *burst* saobraćaja u modelu je sve izraženije, što daje za rezultat veće zagušenje posmatranog linka i implicitno duže prosečno kašnjenje na nivou bafera (Slika 39) [80].





Slika 39. Prosečno kašnjenje na nivou bafera u slučaju obrade paketa  $L = 500 \times 8$  bits,  $ue=100Mbps$  [80]

#### 4.1.4.2 Prosečno kašnjenje na nivou putanje, „sa kraja na kraj“

Kada je za posmatrani tok paketskog saobraćaja definisana putanja (ruta)  $p$ , tada se prosečno kašnjenje paketa „sa kraja na kraj“ putanje ( $T_p$ ) može predstaviti kao suma prosečnih kašnjenja paketa na nivou linkova  $l$ , koji pripadaju posmatranoj putanji [80]:

$$T_p = \sum_{l \in p} T_l \quad (4.7)$$

U slučaju *multicast* saobraćaja, definisana putanja  $p$  reprezentuje *multicast pripadajuće drvo*, koje se može razlikovati po grupi destinacionih čvorova  $n \in b(p)$ . To znači da se, kašnjenje može računati nezavisno za svaku pripadajuću putanju  $p_n$  posebno. U takvoj situaciji, prosečno kašnjenje paketa „sa kraja na kraj“ putanje ( $T_p$ ) predstavlja najduže prosečno kašnjenje, među prosečnim vrednostima kašnjenja koja su korespondentna onim putanjama, koja pripadaju posmatranom *multicast pripadajućem drvetu* [80]:

$$T_p = \max_{n \in b(p)} \left\{ \sum_{l \in p_n} T_l \right\} \quad (4.8)$$

#### 4.1.4.3 Prosečno kašnjenje na nivou mreže

Prosečno kašnjenje na nivou mreže se može definisati kao ono kašnjenje na nivou putanje, „sa kraja na kraj“, koje se odnosi na paket ili drugu jedinicu saobraćaja i koja se na datoj mreži, na slučajan način, uzima za posmatranje [80]. Ovo kašnjenje se može odrediti na sledeći način: posmatra se mreža sa saobraćajem (koji ne pripada tipu *multicast*) na kome postoji skup putanja  $P$ . Neka se po svakoj putanji  $p \in P$ , opslužuje saobraćaj obima  $x_p$ , koji predstavlja deo saobraćajnog zahteva  $d(p)$  po putanji  $p$ . Takođe neka je sa  $h_d$  označen ukupan obim saobraćaja koji je generisan saobraćajnim zahtevom  $d \in D$ . Tada se prosečno kašnjenje na nivou posmatrane mreže ( $T$ ) može predstaviti kao suma ponderisanih vrednosti kašnjenja na nivou različitih putanja sledećim izrazom [80]:

$$T = \sum_p \frac{x_p}{\sum_d h_d} T_p \quad (4.9)$$

Ukoliko nema prioriteta među uspostavljenim putanjama, tada prosečno kašnjenje na nivou posmatrane mreže ( $T$ ) može biti formulisano na sledeći način [80]:

$$T = \frac{1}{\sum_d h_d} \sum_p x_p \sum_{l \in p} T_l = \frac{1}{\sum_d h_d} \sum_l T_l \sum_{p \in P_l} x_p \quad (4.10)$$

#### 4.1.4.4 Pojam verovatnoće zauzeća

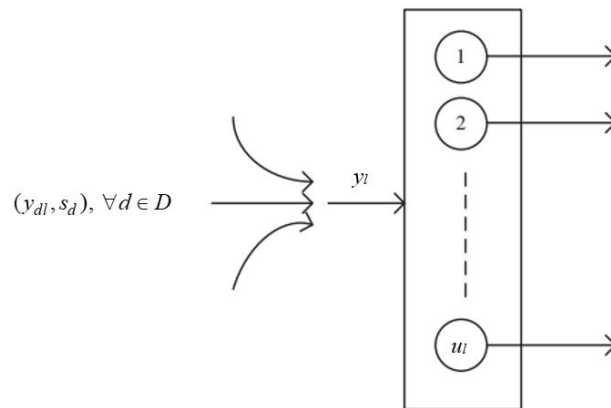
##### 4.1.4.4.1 Verovatnoća zauzeća na nivou linka

Verovatnoća zauzeća na nivou linka se može posmatrati kroz model za procenu verovatnoća zauzeća veza, koje su realizovane na linku  $l$ . Posmatrani link ima modularni kapacitet, koji se predstavlja kroz broj istovremenih veza koji se na njemu mogu realizovati. Imajući navedeno u vidu, razmatra se tzv. *complete sharing* model, gde jedan zahtev za uspostavljanjem veze može biti blokiran ukoliko na linku nije preostao ni jedan slobodan kanal za posluživanje (Slika 40) [80]. U takvoj situaciji, podrazumeva se da je došlo do zauzeća posmatranog linka. Normalizovana vrednost iskorišćenosti linka  $\rho_l = y_l / u_l$  zavisi od ukupnog ponuđenog saobraćaja  $y_l$ , koji

predstavlja sumu pojedinačnih ponuđenih intenziteta saobraćaja  $y_d$  generisanih zahtevima  $d$ , odnosno [80]:

$$y_l = \sum_d y_d . \quad (4.11)$$

Treba napomenuti da, u ovom slučaju, važi pretpostavka da slučajni intervali između uzastopnih zahteva slede Poasonovu raspodelu.



Slika 40. Model zauzeća linka sa pripadajućim čvorom [80]

U slučaju jednoservisnog saobraćaja, verovatnoća zauzeća posmatranog linka ( $B_l$ ) je ista, posmatrano sa aspekta pojedinačnih zahteva i može se predstaviti Erlanogovom B formulom [80]:

$$B_l = E_B [y_l, u_l] = \frac{y_l^{u_l}}{\sum_{k=0}^{u_l} \frac{y_l^k}{k!}} . \quad (4.12)$$

Sa druge strane u slučaju multiservisnog saobraćaja, zahtevi sa različitim vrednostima determinističkog kapaciteta  $s_d$ , imaju različite vrednosti verovatnoća zauzeća  $B_l(d)$ , što se može izračunati Kaufman-Robertsovim rekurzivnim algoritmom [86], [87]

#### 4.1.4.4.2 Verovatnoća zauzeća na nivou mreže

U multiservisnom okruženju, može se posmatrati verovatnoća da posmatrani zahtev  $d$  neće biti opslužen, odnosno da će usled zauzetosti resursa, biti odbijen. Tada

se prosečna vrednost verovatnoće zauzeća na nivou mreže može predstaviti sledeći izrazom [80]:

$$B = \frac{1}{\sum_d h_d} \sum_b h_d B_d \quad (4.13)$$

Imajući u vidu dinamiku saobraćaja, analiza verovatnoće zauzeća po pojedinačnim zahtevima, na nivou mreže može biti veoma komplikovan i iscrpan posao. Zbog toga se često, primenjuju pojednostavljeni modeli, poput [88], [89], koji u zavisnosti od analiza vezanih za jednoservisno odnosno multiservisno okruženje, predstavljaju efikasniji način dolaska do željenih rezultata.

#### 4.1.4.5 Pojam zagušenja na nivou mreže

U mrežama sa komutacijom paketa, zagušenje mreže  $cg$  je definisano kao visok stepen iskorišćenosti posmatranog linka, koji se kolokvijalno naziva i *usko grlo*. Imajući navedeno u vidu, zagušenje posmatranog linka  $l$  može se predstaviti sledećim izrazom [80]:

$$cg = \max_{l \in L} \frac{y_l}{u_l} \quad (4.14)$$

Na primer, ukoliko posmatrana mreža ima vrednost zagušenja 0.8, to znači da najmanje jedan link ima iskorišćenje od 80%, dok u slučaju ostalih linkova iskorišćenje može biti 80% ili manje [80]. Pored navedenog, zagušenje mreže može se formulisati i kroz parametar  $u_u$ , koji se naziva *neiskorišćeni deo kapaciteta u najgorem mogućem scenariju*. Ovaj parametar se izražava kao najmanja od svih vrednosti neiskorišćenog kapaciteta, posmatrano na nivou čitave mreže, odnosno [80]:

$$u_u = \min_{l \in L} (u_l - y_l) \quad (4.15)$$

Treba imati u vidu da se u slučaju primene formule (4.5), (tj. kada veličina paketa varira po eksponencijalnoj raspodeli), suma prosečnih vrednosti kašnjenja na nivou bafera i transmisije na posmatranom linku, u slučaju posmatranog linka, može predstaviti kao  $PL/(u_l - y_l)$ . Ovaj izraz predstavlja obrnuto proporcionalnu vrednost *neiskorišćenog dela kapaciteta*, implicitno ukazujući da mera maksimiziranja vrednosti

$u_u$  vodi ka minimiziranju najgoreg mogućeg slučaja vrednosti kašnjenja na nivou posmatrane mreže [80].

#### 4.1.4.6 Verovatnoća blokiranja kapaciteta

Verovatnoća blokiranja kapaciteta mrežnog resursa (*Bandwidth Blocking ratio*, *BBR*), u mrežama sa komutacijom paketa, predstavlja dodatni indikator pogoršanja performansi veze. Ovaj indikator se uopšteno definiše kao odnos između dela intenziteta saobraćajnog toka koji je neopslužen (odbijen za prenos) na posmatranom resursu i kapaciteta posmatranog resursa. Uzevši u obzir analogiju parametara iz [90], Verovatnoća blokiranja kapaciteta linka  $l$ , koji pripada putanji  $p$  kojom se opslužuje posmatrani tok  $d$  u trenutku  $t$ , ( $BBR_t$ ), može se predstaviti sledećim izrazom [73]:

$$BBR_t^l = \frac{\sum_{p_i^l \in P} y_{p_i^l} - u_l}{u_l} \quad (4.16)$$

gde je  $\sum_{p_i^l \in P} y_{p_i^l}$  suma zauzetih delova kapaciteta svake putanje koja prolazi kroz posmatrani link  $l$ , dok je sa  $P$  označen podskup svih putanja  $p_i^l$ , koje prolaze kroz posmatrani link  $l$  u trenutku  $t$ .

#### 4.1.4.7 Pojam troškova mreže

Troškovi mreže predstavljaju jedan od kriterijuma optimizacije u procesu planiranja. Formiranje precizne strukture troškova predstavlja izrazito složenu aktivnost i ona se, u kontekstu planiranja, obavlja na nivou STP planskih aktivnosti, dok se u slučaju MTP i LTP planskih aktivnosti, praktikuje formiranje uopštenih i jednostavnijih troškovnih struktura, kao što je prikazano u prvom i petom poglavlju. U navedenom kontekstu, u ovom poglavlju će biti prikazan pojednostavljeni model troškova mreže, koji je pogodan za primenu u metodama optimizacije<sup>9</sup>.

Ukupni troškovi jedne mreže ( $C$ ), mogu se predstaviti kao zbir sume troškova svih linkova  $cp(l)$  i sume troškova svih čvorova  $cp(n)$ , odnosno [80]:

---

<sup>9</sup> Primena troškova mreže u optimizacionim modelima prikazana je u šestom poglavlju

$$C = \sum_l cp(l) + \sum_n cp(n) = \sum_l cp_f(l) + cp_v(l, u_l) + \sum_n cp_f(n) + cp_v(n, u_n), \quad (4.17)$$

gde su  $i$  troškovi linkova i troškovi čvorova, predstavljeni kroz sume odgovarajućih fiksnih ( $cp_f$ ) i varijabilnih ( $cp_v$ ) troškova. Fiksni troškovi se odnose na resurse kojima se obezbeđuje fizičko postojanje linkova i čvorova, dok su varijabilni troškovi vezani za nivo kapaciteta, koji se nadgrađuje (proširuje) tokom vremena [80].

#### 4.1.4.8 Funkcija troškova zagušenja

Kao što je prikazano u prethodnom poglavlju, kapacitet mrežnih resursa (čvorova i linkova), predstavlja faktor varijabilnosti u strukturi troškova jedne mreže. Formula (4.15) ukazuje da kapacitet posmatranog resursa zavisi od stepena njegove iskorišćenosti. Pošto, u realnom okruženju postoji stalan rast saobraćajnih zahteva, proširenje kapaciteta se može posmatrati kao kontinualan proces, dajući sumi varijabilnih troškova rastući karakter. Imajući u vidu da se interes mrežnih operatora reflektuje kroz proces minimizacije troškova, kao i da cene mrežnih resursa određene generacije opadaju tokom vremena, može se uvesti mogućnost odlaganja proširenja kapaciteta, do momenta kada se uoči kritičan nivo zagušenja na posmatranim mrežnim resursima. Zagušenje u određenoj meri može biti kontrolisano primenom QoS mehanizama, ali daljim povećanjem zagušenja, navedeni vid kontrole postaje neefikasan, uzrokujući kritične gubitke saobraćajnih zahteva i, posredno, pojavu nezadovoljstva korisnika što daje za rezultat pad profita. Ovaj pad profita se može posmatrati kao vid oportunitetnog troška za izgubljeni prihod [91].

Da bi se izbegli neželjeni efekti odlaganja odluka o proširenju kapaciteta, u praksi se primenjuju metode procene troškova, koje mogu da nastanu usled pojave zagušenja na mrežnom linku. Procena ove vrste troškova zasniva se na upotrebi *funkcije troškova zagušenja*, koja se može opisati kao *nivo penala* (nivo troškova) kojim se posmatrani resurs „kažnjava“ u slučaju pojave zagušenja. Mehanizam „kažnjavanja“ je takav da, što je veći jedinični nivo iskorišćenja posmatranog resursa – to je veći priraštaj nivoa troškova po jedinici opterećenja i obrnuto (Slika 41) [91]. U literaturi postoje različiti načini na koje se ovaj mehanizam može opisati u matematičkom obliku. U opštem slučaju [92], ukoliko posmatramo link  $l$ , kao mrežni resurs sa kapacitetom  $u_l$ ,

funkciju troškova zagušenja najpogodnije je opisati kao konveksnu, neprekidnu i neopadajuću funkciju  $f_l(y_l)$ , odnosno [92]

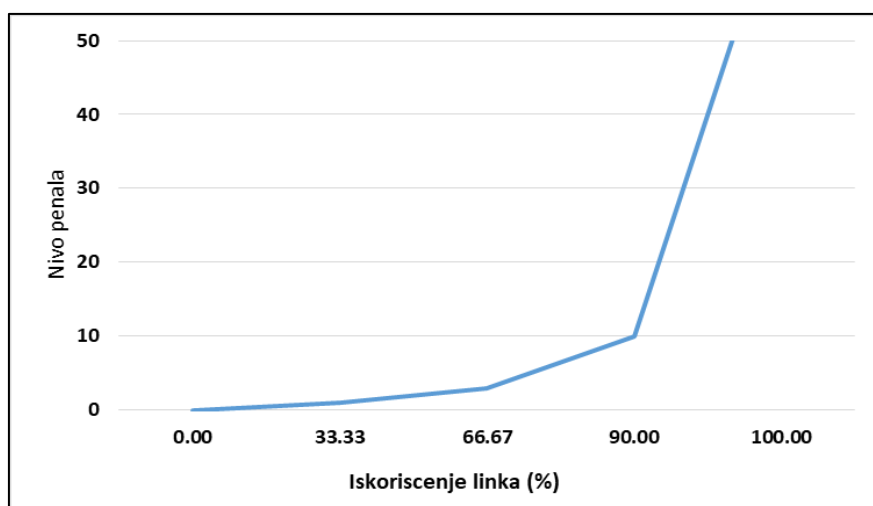
$$f_l(y_l) = \frac{y_l}{u_l - y_l}, \quad y_l \leq u_l, \quad \forall l \in L. \quad (4.18)$$

U literaturi, funkcija troškova zagušenja figuriše u širokom spektru modela, poput [93], [94] gde se ispituje problem optimizacije mrežnog rutiranja (u slučaju *OSPF* protokola rutiranja), sa komparativnom analizom vezanom za primenu MPLS tehnologije. Funkcija troškova, sa oblikom bliskim (4.18), prikazana je kod primene teorije igara u analizi odnosa energetske efikasnosti i upotrebe *load balancing* koncepta, u slučaju primene MPLS tehnologije [92]. Pored navedene, *Fortz&Thorup*-ova funkcija troškova zagušenja [93] (Slika 41) je iskorišćena i za probleme proširenja kapaciteta resursa magistralnih mreža za internet saobraćaj [95]. Treba naglasiti da su delovi istraživanja, čiji su rezultati predstavljeni u [96], [97], bili inspirisani upravo upotrebom ove funkcije u problemima predstavljenim u [98]. Vrednost ove funkcije  $\phi(\rho_l)$  zavisi od iskorišćenosti linka  $\rho_l$  i to na sledeći način [80]:

$$\phi(\rho_l) = \begin{cases} 1 & za & 0 \leq \rho_l < 1/3 \\ 3 & za & 1/3 \leq \rho_l < 2/3 \\ 10 & za & 2/3 \leq \rho_l < 9/10 \\ 70 & za & 9/10 \leq \rho_l < 1 \\ 500 & za & 1 \leq \rho_l < 11/10 \\ 5000 & za & 11/10 \leq \rho_l < \infty \end{cases}. \quad (4.19)$$

Funkcija troškova zagušenja je koncipirana tako da se unapred utvrđenim vrednostima *cost* parametara linkova, koji pripadaju visoko opterećenim rutama, pridružuju dodatne vrednosti troškova, sa ciljem da se posmatrani obim saobraćaja preusmeri (rutira) ka manje opterećenim rutama, odnosno linkovima koji imaju niže vrednosti *cost* parametra. Rezultat dobijen primenom ovog modela bio je blizak optimalnom rešenju, koje podrazumeva optimalnu opterećenost svih pripadajućih linkova u posmatranoj mreži. Problem optimizacije rutiranja u slučaju upotrebe *OSPF* protokola, uz upotrebu ove funkcije, rešavali su *Ericsson*, *Resende* i *Pardalos* [94], primenom genetskog algoritma. Navedenu funkciju koristio je i *Oliver Heckmann*, u modelima za izbor optimalne strategije proširenja kapaciteta, predstavljenim u [98].

Nabrojani modeli, pored razlika u samoj prirodi problema koji su rešavani, razlikuju se i po ulozi funkcije troškova zagušenja. Naime, *Fortz* i *Thorup* su stavili akcenat na upotrebu navedene funkcije kao oblika ograničenja, zadržavajući početne postavke funkcije cilja, a sa primarnim ciljem da, pomoću karakteristike funkcije (skup rastućih linearnih funkcija i konveksnom karakteristikom funkcije, duž celog intervala), realizuju izvršenje korespondentne heuristike u polinomijalnom vremenu. Nasuprot tome, *Heckmann*, u svojim modelima, navedenu funkciju postavlja kao deo funkcije cilja, integrišući je sa troškovima opreme, uz zadržavanje osnovnih karakteristika funkcije (linearni delovi funkcije i konveksnost), ali isključujući mogućnost formiranja rešenja kroz upotrebu heuristike [91].



Slika 41. *Fortz* i *Thorup*-ova funkcija troškova zagušenja sa prikazanim opsegom penala (0-50), adaptirano na osnovu [98]

Funkcija zagušenja (4.19). primenjena je i u ovoj doktorskoj disertaciji prilikom definisanja troškova zagušenja u slučaju primene optimizacionog modela predloženog u (6.2.2.5).

#### 4.1.4.9 Primena Funkcije troškova zagušenja i Verovatnoće blokiranja kapaciteta u rešavanju problema proširenja kapaciteta WDM linka

Procesi planiranja, koje su analizirani u ovoj doktorskoj disertaciji, uključuju primenu metoda prognoziranja saobraćaja, u sklopu rešavanja različitih vrsta problema, kako na LTP, tako i na MTP nivou. U toku istraživanja, nametnulo se pitanje mogućnosti upotrebe istih setova prognoziranih podataka za različite namene. Ovo



pitanje ima poseban značaj, imajući u vidu da se prognoziranje saobraćajnih zahteva, po svojoj prirodi, vrši sa pretpostavkom da postoji određen nivo neizvesnosti<sup>10</sup>, koji raste u skladu sa dužinom vremenskog okvira za primenu metoda prognoziranja. Da bi se umanjili efekti uticaja neizvesnosti na proces planiranja, uobičajena je praksa da se, sa povećanjem zadatog vremenskog okvira planiranja, smanjuje nivo zahtevane detaljnosti prilikom razrade planskih dokumenata. Pošto se kombinovanom primenom odgovarajućih metoda, vezanih za prognoziranje tražnje na telekomunikacionom tržištu, mogu dobiti prognozirane vrednosti saobraćajnih zahteva, postavljena je hipoteza da se primenom odgovarajućih parametara, koji figurišu u procesima karakterizacije saobraćaja, može uticati na smanjenje neizvesnosti, a samim tim i na nivo razlika između procena i odluka na LTP i MTP nivou.

Kao što je već navedeno, kao osnova, za analizu mogućih rešenja, upotrebljen je problem proširenja WDM linka, rešavan na slučaju hipotetičke mreže od 10 čvorova, u kome je razmatrana strategija proširenja WDM linka sa pripadajućim čvorom, na kome je instalirana fiksna *grid* tehnologija. Politika proširenja kapaciteta posmatranog linka uključuje mogućnost proširenja kapaciteta sa fiksnim *grid* resursima, kao i migraciju ka fleksibilnoj *grid* tehnologiji, u trenutku kada upotreba fiksne *grid* tehnologije nije više održiva.

Imajući navedeno u vidu, u fokus interesovanja postavljen je upravo slučaj migracije tehnologija, sa ciljem da se ispita uticaj odabranih parametara za karakterizaciju saobraćaja na vreme donošenja odluke o migraciji tehnologije, u prisustvu neizvesnosti.

Analiza problema zasnovana je na pretpostavci da neizvesnost ima veći uticaj u slučajevima kada je potrebno analizirati zagušenje saobraćaja, u poređenju sa slučajevima u kojima je iskorišćenje posmatranog linka na prihvatljivom nivou. Na primer, isti stepen neizvesnosti je „prihvatljiviji“ u slučajevima iskorišćenja linka u opsegu 10%-90%, nego u slučajevima iskorišćenja u opsegu 90%-100%, koji predstavlja kritičnu zonu, kako za održivost performansi, tako i za donošenje odluke o

---

<sup>10</sup> Uloga *neizvesnosti* u procesima planiranja, sa različitih aspekata, je predstavljena u poglavljima 2,3 i 5.

proširenju kapaciteta. Da bi se naglasila razlika između kritičnih vrednosti, upotrebljena je funkcija troškova zagušenja, predstavljena formulom (4.18).

Izbor drugog parametra za karakterizaciju saobraćaja, zasnovan je na sledećim principima:

1. migracija ka fleksibilnim *grid* tehnologijama sprovodi se u uslovima kada proširenje fiksnih *grid* kapaciteta više nije održivo (tj. kada i nakon sprovedenog proširenja, nivo iskorišćenja postaje blizak ili ostaje na nivou zagušenja),
2. realizacijom migracije, posmatrani čvor se pridružuje susednom *fleksibilnom ostrvu*<sup>11</sup>, usvajaju se pravila koegzistencije susednih čvorova (jedan čvor ima tehnologiju fiksnog *grida*, dok drugi čvor ima tehnologiju fleksibilnog *grida*), na osnovu kojih je moguće realizovati saobraćaj određenog intenziteta, preko korespondentnog linka, uzimajući u obzir podatke iz Tabele 7.

Tabela 7. Alokacija WDM spektra na linku, u uslovima koegzistencije čvorova sa različitim tehnologijama [99]

WDM kanal	Fiksni <i>grid</i>		Fleksibilni <i>grid</i>	
	Širina WDM kanala	Broj potrebnih talasnih dužina	Širina WDM kanala	Broj potrebnih slotova
40 Gbps	50 GHz	1	25 GHz	2
100 Gbps	50 GHz	1	37.5 GHz	3
200 Gbps	100 GHz	2	75 GHz	6
400 Gbps	200 GHz	4	125 GHz	10

Imajući u vidu navedene pretpostavke, uzeta je u obzir mogućnost da u uslovima kritičnog zagušenja čvora (sa fiksnom *grid* tehnologijom) ponuđeni saobraćajni zahtev sa visokim intenzitetom saobraćaja (koji zahteva angažovanje dve ili četiri talasne dužine) ne bude opslužen na posmatranom linku, usled nedovoljnog broja raspoloživih talasnih dužina. Shodno [99], kao i prvoj navedenoj pretpostavci, za drugi parametar odabrana je Verovatnoća blokiranja kapaciteta (BBR).

Da bi se ispitalo ponašanje odabranih parametara, pretpostavljena su tri saobraćajna profila (P1, P2 i P3), [99], u kojima su saobraćajni zahtevi (sa intenzitetima 40Gb/s, 100Gb/s, 200Gb/s i 400Gb/s) zastupljeni u različitim procentima (Tabela 8).

<sup>11</sup> Poglavlje 7

Tabela 8. Zastupljenost različitih saobraćajnih zahteva u saobraćajnim profilima [99]

Tip zahteva	Profil P1	Profil P2	Profil P3
40 Gbps	50 %	20 %	0 %
100 Gbps	30 %	50 %	40 %
200 Gbps	15 %	20 %	40 %
400 Gbps	5 %	10 %	20 %

U skladu sa [80], usvojeno je da je proces generisanja zahteva Poasonovski, sa prosečnim intenzitetom nailazaka zahteva  $\lambda$ , kao i sa eksponencijalno raspodeljenim vremenom zauzeća kanala, sa srednjom vrednosti  $1/\mu=1$ , tako da je intenzitet generisanog saobraćaja  $\rho=\lambda/\mu=\lambda$  Erlanga. Treba napomenuti da se jedan zahtev, generiše na osnovu ravnomerno raspodeljenog izbora među četiri navedena tipa saobraćajnih profila (Tabela 8), određujući, na takav način, broj zauzetih talasnih dužina (tj. fiksnih *grid* WDM kanala) koji je neophodno zauzeti na linku da bi zahtev bio opslužen. Broj mogućih zahteva ograničen je prognoziranim kumulativnim brojem rezidencijalnih korisnika (Slika 31 i 36), predstavljenim u poglavlju 3.4.5, kao i sa pretpostavkama, koje su u skladu sa [100]. Kao indikator za donošenje odluke o migraciji tehnologije posmatranog čvora ka fleksibilnoj *grid* tehnologiji, pretpostavljena je BBR vrednost 0.01. Za izračunavanje vrednosti predloženih parametara, upotrebljena je Net2Plan aplikacija [90], [101] sa opcijom automatskog generisanja saobraćajne matrice i *off-line* opcijom planiranja, uz rešavanje RSMA (*Routing Spectrum Modulation Assignment*) problema, sa prilagođenim skriptom za istovremeno prisustvo čvorova sa fiksnim i fleksibilnim tehnologijama. Postupak proračuna je iterativno sproveden za svaku godinu, za koju je sprovedeno prognoziranje. Rezultati za posmatrani link, sa dobijenim vrednostima iskorišćenja, kao i korespondentnim BBR vrednostima, prikazani su u Tabeli 8. Na osnovu dobijenih vrednosti iskorišćenja, upotrebom funkcije troškova zagušenja (4.18), proračunate su korespondentne vrednosti penala, koje su grafički prikazane na Slici 42.

Poređenjem dobijenih rezultata, prikazanih u Tabeli 9 i Slici 42 uočeno je sledeće [73]:

- vrednosti BBR parametra su jednake ili približno jednake nuli, usled odsutnosti kritičnih vrednosti zagušenja linka, sve do godine 2019. Nadalje, u 2019. godini,

BBR vrednosti za saobraćajne profile P2 i P3, prekoračuju vrednost 0,01, koja predstavlja prag odluke za sprovođenje migracije tehnologija;

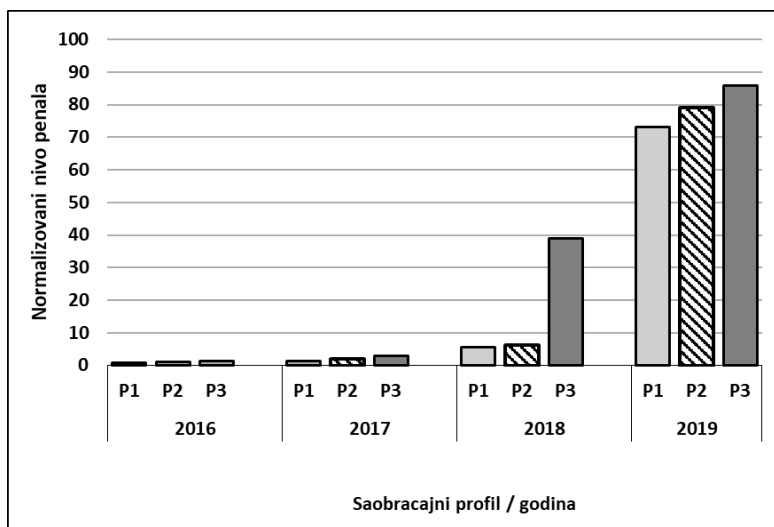
- značajan porast nivoa penala funkcije troškova zagušenja, može se uočiti za saobraćajni profil P3, ukazujući na značajnu pojavu zagušenja i pada performansi posmatranog linka;
- dalji porast nivoa penala nastavlja se i u godini 2019, za sva tri saobraćajna profila.

Tabela 9. Vrednosti iskorišćenja linka i BBR parametra, prema godini i saobraćajnom profilu za period prognoziranja (2016-2019) [73]

Godina	Profil	BBR	Iskorišćenje linka
2016	P1	0	0.425
	P2	0	0.500
	P3	0	0.588
2017	P1	0	0.575
	P2	0	0.663
	P3	0	0.750
2018	P1	0	0.850
	P2	≈0	0.863
	P3	≈0	0.975
2019	P1	0.002838	0.987
	P2	0.013798	0.988
	P3	0.044178	0.989

Imajući navedeno u vidu, na osnovu primene funkcije troškova zagušenja i Verovatnoće blokiranja kapaciteta, moguće je predložiti sledeću strategiju proširenja kapaciteta za čvor 5 i link 3-5 [73]:

- u slučaju realizacije saobraćajnog profila P3, proces migracije je potrebno započeti u toku 2018. godine, a završiti najkasnije do kraja 2019. godine imajući u vidu drastičan porast BBR vrednosti u toj godini (0.044178);
- u slučaju realizacije saobraćajnih profila P1 ili P2, proces migracije je potrebno realizovati u toku 2019. godine, imajući u vidu visok nivo penala, za oba navedena profila, kao i prekoračenje BBR praga (0.01) u slučaju saobraćajnog profila P2 (0.013798).



Slika 42. Normalizovani nivoi penala, klasifikovani prema saobraćajnom profilu i godini, za period prognoziranja (2016-2019) [73]

Treba napomenuti da je prikazana analiza realizovana na osnovu opštih pretpostavki i da drugi faktori (poput troškova proširenja i dr.) nisu uzimani u obzir. Uočeno je da se prikazani rezultati, u slučaju saobraćajnog profila P3, u značajnoj meri, podudaraju sa rezultatima primene optimizacionog modela, strategije proširenja kapaciteta linka, prikazanih u poglavlju 7.6. Zaključeno je da primena navedenih parametara može poslužiti kao indikator migracije tehnologija, isključivo u slučaju, kada se oba parametra koriste zajedno.

Imajući u vidu navedeno, treba istaći:

1. da je prikazana analiza (koja uključuje i navedene odluke o proširenju) sprovedena nad prognoziranim vrednostima na LTP (godišnjem) nivou i
2. da proširenje kapaciteta linka u fiksnoj grid mreži, uz mogućnost migracije ka fleksibilnoj grid tehnologiji, pripada grupi problema, u kojoj se podrazumeva, kako upotreba prognoiranog saobraćaja, tako i donošenje odluka na MTP (mesečnom) nivou.

Na osnovu navedenog, može se zaključiti da se primenom odgovarajućih parametara za karakterizaciju saobraćaja, može uticati na smanjenje neizvesnosti, koje je prisutno prilikom donošenja bitnih odluka na dugoročnom nivou (poput odluka koje se odnose na promenu tehnologija), a samim tim i do smanjenja razlika u odnosu na

korespondentne odluke, donete na srednjoročnom nivou, čime se dodatno mogu umanjiti efekti neusklađenosti, o kojima je bilo više reči u poglavlju 2.3.1.

## 4.2 Merenje i monitoring mrežnog saobraćaja

Merenje i monitoring mrežnog saobraćaja, u uslovima svakodnevnog porasta aktivnosti na internetu, predstavlja jednu od najvažnijih aktivnosti mrežnog operatora. Shodno navedenom, raste i važnost alata za praćenje i analizu mrežnog saobraćaja, a koji treba da ispune sledeće ciljeve:

- održanje i unapređenje stabilnosti mrežnog sistema,
- održanje i unapređenje dostupnosti odgovarajućih servisa,
- automatizovana i poluautomatizovana reakcija na identifikovane probleme na posmatranoj mreži,
- identifikacija i praćenje vrednosti tehničkih parametara mreže (u vidu vremenskih serija), neophodnih u procesu planiranja na tehničkom nivou,
- identifikacija i praćenje značajnih parametara servisa (u vidu vremenskih serija), neophodnih za uspešnu tehno-ekonomsku analizu.

Primena merenja i monitoringa mrežnog saobraćaja ima značaj za sprovođenje planskih aktivnosti kako na STP, tako i na MTP i LTP nivou. STP planovi imaju direktnu zavisnost od rezultata merenja i monitoringa mrežnih aktivnosti, imajući u vidu činjenicu da se kratkoročne planske aktivnosti realizuju na osnovu egzaktnih podataka dobijenih od korespondentnih monitoring alata. Pored toga, analiza vremenskih serija pruža mogućnost prognoziranja nivoa zahteva, kako na nivou agregiranih vrednosti, tako i na nivou pojedinih servisa.

Generalno posmatrajući, izbor alata i primena protokola za merenje i monitoring saobraćaja zavisi od segmenta mreže, kao i od nivoa detaljnosti informacija koje treba prikupiti, u skladu sa značajem posmatranog dela mreže.

U narednom delu teksta biće prikazani najvažniji parametri mreže, čiji su podaci, neophodni za kvalitetno dimenzionisanje mrežnih resursa, nakon čega će biti pružen kratak osvrt na *Simple Network Management protokol* i *Netflow* tehnologiju, koji imaju značajnu ulogu u procesima merenja i monitoringa mrežnog saobraćaja.

### 4.2.1 Referentni vremenski periodi

Čas glavnog opterećenja (*Busy Hour, BH*) predstavlja period od 60 minuta, u kome je zabeleženo najveće saobraćajno opterećenje u toku perioda od 24 časa. Prema ITU-T Rec. E.500 [16], čas glavnog opterećenja je srednja vrednost svih dnevnih maksimalnih vrednosti intenziteta saobraćaja merena tokom dužeg vremenskog perioda (više dana) sa dopuštenim varijacijama saobraćaja unutar definisanih granica tolerancije. *BH* se određuje za svaki servis posebno, kao i za svaku grupu tehničkih entiteta, koji su od značaja za opterećenje. Period sa najvećim intenzitetom saobraćaja se ne mora pojaviti svakog dana u isto vreme. Zbog toga je uveden koncept vremenski konzistentnog časa glavnog opterećenja (*time consistent busy hour, TCBH*), kao fiksni period od 60 minuta (sa preciznošću od +/-15 minuta), u kome je u toku perioda od 24 časa, tokom merenja u dužem vremenskom periodu, statistički utvrđeno da se realizuje najveći intenzitet saobraćaja. Vrednost *TCBH* predstavlja srednju vrednost posmatranog statističkog jednočasovnog uzorka (četiri uzastopna petnaestominutna intervala, dobijenih kroz kontinualna petnaestominutna merenja) i ona se, u slučaju stabilnih saobraćajnih profila, može usvojiti kao *BH*. Stoga se može dogoditi da, u pojedinim danima, saobraćaj sa najvećim intenzitetom bude veći od utvrđene *BH* vrednosti, ali na sedmičnom, mesečnom ili godišnjem nivou, *BH* vrednost ima najveću vrednost. Pored navedenog, treba razlikovati čas glavnog opterećenja u slučajevima celog telekomunikacionog sistema, jednog mrežnog čvora ili agregiranog linka (poput VLAN *trunk* linkova) [25]. Za svaki od navedenih slučajeva, časovi glavnog opterećenja ne moraju biti isti, odnosno sa istim vrednostima. Pored navedenih, standardom ITU-T Rec. E.500 [16], definisane su i sledeće veličine:

- Srednji dnevni čas maksimalnog opterećenja (*Average Daily Peak Hour, ADPH*), gde se za srednju vrednost zadržavaju oni časovi najvećeg opterećenja (četiri uzastopna petnaestominutna intervala, dobijenih kroz kontinualna petnaestominutna merenja) tokom svih dana, posmatrano u odnosu na celokupan period u kome je vršeno merenje.

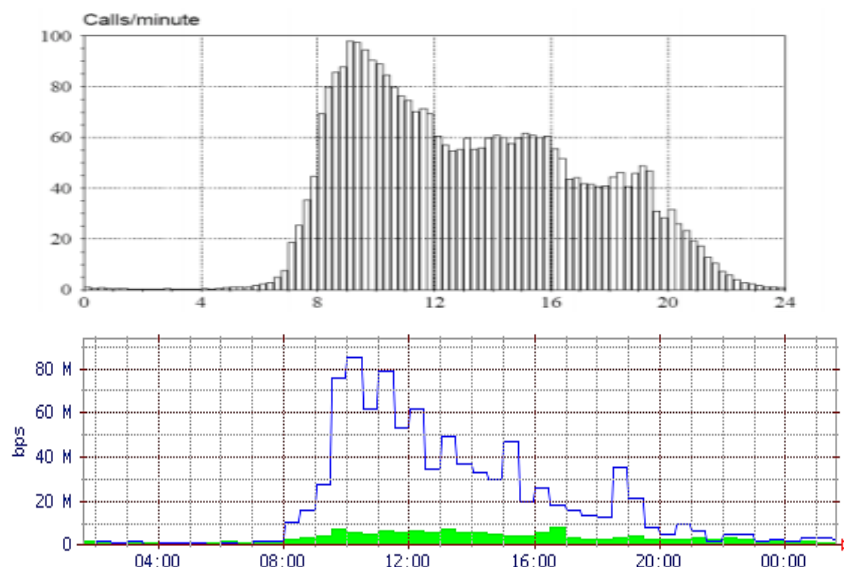
- Srednji dnevni pun čas maksimalnog opterećenja (*Average Daily Peak Full Hour, ADPFH*), odnosno intenzitet saobraćaja, koji se meri kontinuirano tokom svih dana u godini (u časovnim intervalima), pri čemu se izdvajaju časovi najvećeg opterećenja (za svaki dan ponaosob) koji se nadalje koriste za dobijanje srednje vrednosti. Vrednosti dobijene ovom metodom pokazuju visok stepen konsistencije sa vrednostima dobijenih primenom *TCBH* metode.

Stabilnost saobraćajnih profila utiče na preklapanje vrednosti navedenih veličina. U slučaju veoma stabilnih saobraćajnih profila, može doći do preklapanja vrednosti *TCBH* i *ADPH*. Nasuprot navedenom, u slučaju nestabilnih profila, umesto profila dobijenog *TCBH* metodom, usvaja se profil dobijen *ADPH* metodom.

#### 4.2.2 Saobraćajni profili

Saobraćajni profil se može definisati kao varijacija saobraćaja u toku definisanog vremenskog perioda. Klasičan primer je saobraćajni profil dobijen na osnovu merenja saobraćaja u periodu od 24 časa (Slika 43). Iako saobraćaj u navedenom periodu ima stohastički karakter, poređenjem dnevnih uzoraka na nivou nekoliko dana, može se prepoznati deterministička kriva sa određenim stepenom stohastičkih varijacija. Saobraćajni profili se razlikuju, kako prema vrstama korisnika, na osnovu čijih zahteva se generiše posmatrani saobraćaj, tako i prema vrstama servisa, koje posmatrana grupa korisnika upotrebljava. Saobraćajni profil je, po pravilu, jedinstven za određenu populaciju korisnika, a definisan je vrstom i stepenom aktivnosti pripadnika posmatrane populacije tokom posmatranog vremenskog intervala.





Slika 43. Saobraćajni profili u slučaju telefonskog (a) i internet saobraćaja (b)

Za jedan saobraćajni profil se može reći da je stabilan, ukoliko se dnevni saobraćajni profili veoma malo razlikuju po obliku i obimu, međusobno posmatrano. Nasuprot tome, saobraćajni profil se može oceniti kao nestabilan, ukoliko postoji značajna razlika u međusobnom poređenju dnevnih profila saobraćaja.

### 4.2.3 Simple Network Management Protocol

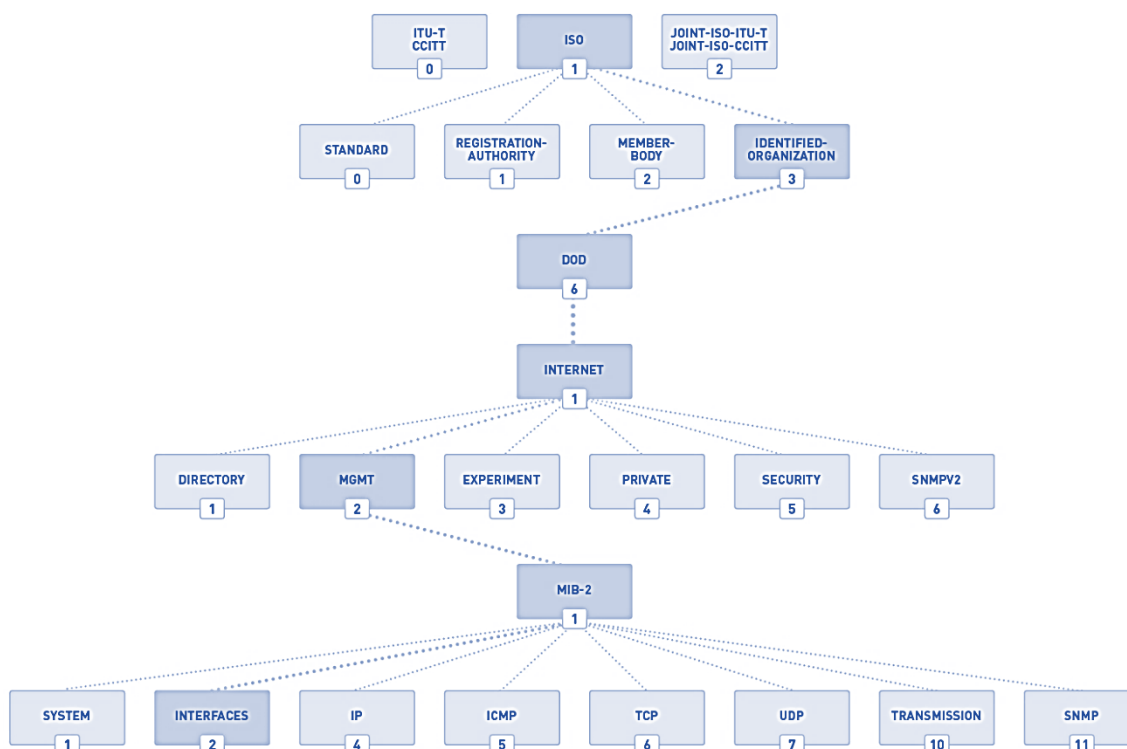
U slučaju lokalnih i pristupnih mreža, gde je potreba ograničena na praćenje performansi i ograničenog reaktivnog dejstva, pogodna je upotreba alata, zasnovanih na upotrebi *Simple Network Management Protocol*-a (SNMP), definisanih serijom IETF standarda, čiji je pregled prikazan u Prilogu 1, Tabela 2. SNMP je protokol OSI aplikacionog sloja, koji funkcioniše na principu tzv. „menadžer – agent“ odnosa. „Menadžer“ i „agent“ koriste tzv. upravljačku bazu podataka (*Management Information Base*, MIB) i relativno mali skup komandi za razmenu informacija. MIB baza je hijerarhijski organizovana (sa strukturom „drveta“) sa pojedinačnim varijablama, predstavljena na „granama“ (Slika 44). Shodno hijerarhiji, svaki objekat, koji postoji u MIB bazi, može se uniformno predstaviti putem jedinstvene numeričke sekvence (*Object Identifier*, OID), na način, prikazan sledećim primerom:

```

Iso(1).org(3).dod(6).internet(1).private(4).transition(868).products(2).chassis(4).card(1).slotCp
s(2)-.cpsSlotSummary(1).cpsModuleTable(1).cpsModuleEntry(1).cpsModuleModel(3).3562.3,

```

odnosno u realnom (skraćenom) obliku: 1.3.6.1.4.868.2.4.1.2.1.1.1.3.3562.3



Slika 44. Hijerarhijska organizacija MIB baze

„Menadžer“ i „agent“ komuniciraju upotrebom pet osnovnih poruka (*get*, *get-next*, *get-response*, *set* i *trap*) za komunikaciju između, tako što „menadžer“ traži od „agenta“ vrednost određene varijable, kroz poruke *get* i *get-next*, nakon čega „agent“ uzvraća informaciju sa *get-response* porukom. Po istom principu „menadžer“ može da definiše vrednost posmatrane varijable upotrebom *set* poruke, na koju će „agent“ takođe odgovoriti *get-response* porukom u slučaju uspešno izvršene promene. Za razliku od *get* i *set* poruka koje se iniciraju na zahtev „menadžera“, postoji i *trap* poruka, koja se automatski šalje ka menadžeru u slučaju vanrednih događaja, poput otkaza komponente, nad kojom se vrši nadzor i upravljanje. Popularni alati za merenje i monitoring, koji koriste SNMP prikupljanje podataka su "MRTG" (Multi Router Traffic Grapher) , Solarwinds NPM, PRTG, WhatsUp Gold, OpManager, Nagios<sup>12</sup> i sl.

<sup>12</sup> Nagios alati za monitoring osim SMTP protokola mogu koristiti i druge protokole i tehnologije (poput *NetFlow*)

Imajući u vidu planske aktivnosti na nivou lokalnih i pristupnih mreža, upotreba alata baziranih na SNMP protokolu, pruža pogodnost za formiranje kratkoročnih planova. U slučaju srednjoročnih i dugoročnih planskih aktivnosti, gde postoji potreba za karakterizacijom saobraćaja, identifikacijom saobraćajnih profila, kao i dubljim analizama servisa neophodnim za tehno-ekonomske analize, poželjna je upotreba alata baziranih na tzv. *NetFlow* tehnologijama, na koju će biti pružen osvrt u narednom poglavlju.

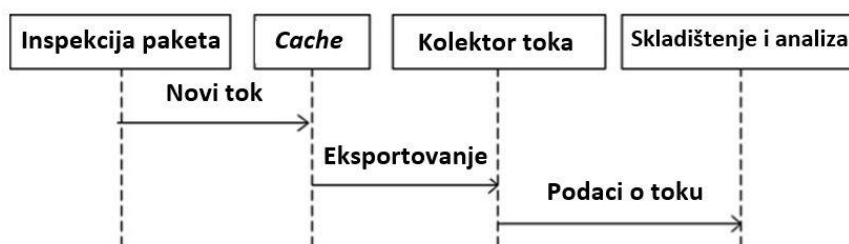
#### 4.2.4 NetFlow

Pod terminom *NetFlow*, označen je skup rešenja, koji uključuje tehnologiju, mrežni protokol, kao i format podataka, razvijenih prvobitno od strane kompanije Cisco Systems, u cilju prikupljanja statistika o mrežnom saobraćaju. Pored navedenog protokola, razvijena je serija rešenja, odnosno protokola, od strane drugih proizvođača<sup>13</sup>, pri čemu je zadržan osnovni set kompatibilnosti sa *Netflow* tehnologijom. *NetFlow* protokol, je razvijen u više verzija. Najveći značaj ima verzija *Cisco NetFlow V9*, na osnovu koje je, od strane IETF organizacije, definisan ekvivalentni protokol poznatiji kao IPFIX (*Internet Protocol Flow Information eXport*, IETF RFC7011) [102], sa svrhom efikasnog eksporta prikupljenih statistika o mrežnom saobraćaju.

Ovom tehnologijom, definisan je način kako ruter izvozi informacije i statistiku vezanu za rutirani saobraćaj. Princip funkcionisanja je zasnovan na inspekciji sadržaja paketa, koji pristižu na određeni interfejs (konekcionni priključak, odnosno port), na osnovu čega se formira statistika o saobraćajnom toku (kome paket pripada). Potom se formira keširani zapis, koji se pridružuje drugim podacima i zajedno eksportuje preko toka podataka realizovanog upotrebom UDP ili *Stream Control Transport Protocol (SCTP)* protokola (Slika 45).

---

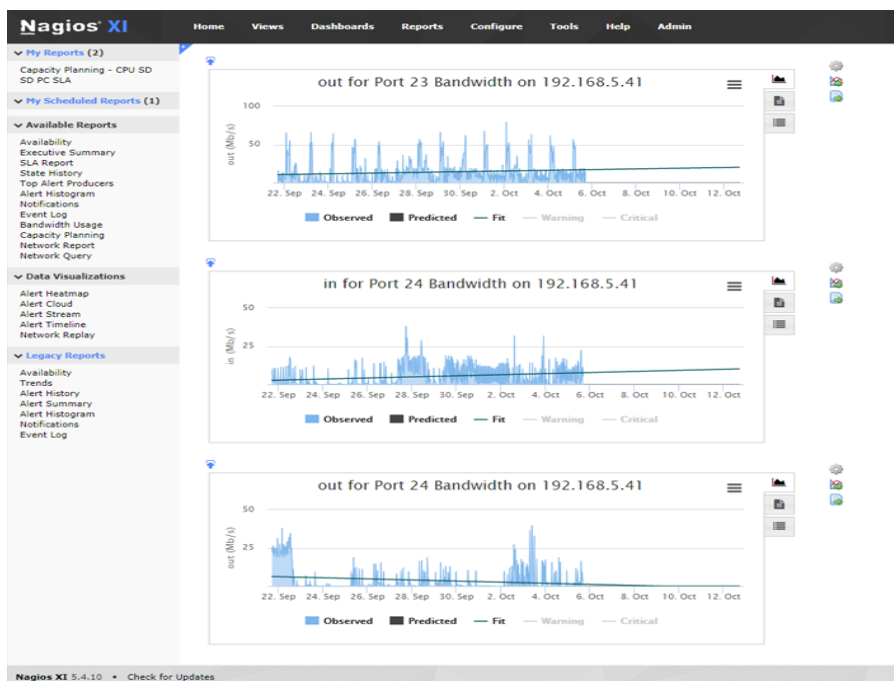
<sup>13</sup> Huawei (*NetStream*), 3Com/HP/Dell/Netgear (*sflow*), Juniper (*Jflow*), Alcatel-Lucent (*Cflow*), Ericson (*Rflow*), MikroTik (*TrafficFlow*) i sl.



Slika 45. Netflow - koncept prikupljanja podataka o toku

*NetFlow* keširani zapis se kreira sa pojavom prvog paketa novog toka (identifikovanog na osnovu pojave sličnosti). Ovaj zapis se, potom, eksportuje ka kolektorima, u vremenskim intervalima definisanim tajmerom toka. Format zapisa u prvih osam verzija protokola je identičan, dok je u verziji 9 izvršena izmena sa ciljem integracije podataka, vezanih za *MPLS*, *IPv6* i *BGP*, kao i mogućnosti prenosa korisnički definisanih zapisa.

Značaj *Netflow* tehnologije se zasniva na zapisima o tokovima. Zapisi sadrže detaljne podatke o karakteristikama posmatrane internet konekcije, bez zalaženja u sadržaj podataka koji se prenose. Prikupljanje i analiza podataka o karakteristikama tokova na posmatranoj mreži, realizuje se sa većim stepenom efikasnosti, u poređenju sa tehnikom detaljne inspekcije paketa (*deep packet inspection*) [103], kao i sa većim kvalitetom pruženih informacija, jer sadrže podatke o spoljnih i unutrašnjim aktivnostima na mreži, identifikaciju nepravilne konfiguracije na posmatranoj mreži ili pojavu kršenja zadanih polisa, pri čemu je zagarantovana privatnost komunikacije korisnika [104] (Slika 46).



Slika 46. Prikaz Nagios NetFlow monitoring interfejsa

U poređenju sa drugim protokolima i tehnologijama, poput SNMP ili *Windows Management Instrumentation* (WMI), *NetFlow* podaci mogu pružiti analizu propusnog opsega, specifičan nadzor protokola i performanse sistema i sl. [103]. Rezultati ovakve analize mogu dati informacije poput [105]:

- informacije o ukupnom prenetom saobraćaju između pojedinih podmreža (*subnets*), na nivou bajta, paketa i/ili konekcije;
- informacije o ukupnom prenetom saobraćaju, grupisane po protokolima, servisima, hostovima;
- informacije o spoljašnjim pristupima posmatranoj mreži, na nivou protokola, servisa, hostova i sl.;
- detekcija saobraćaja, blokiranog na osnovu primenjene *access* liste (*ACL*);
- detekcija saobraćaja, odbačenog usled lošeg rutiranja (tzv. „crne rupe“);
- mogućnost predikcije ponašanja saobraćaja u budućnosti (trendovi i sl.);
- informacije o komunikacijama između autonomnih sistema (*AS*);
- informacije o saobraćaju, grupisano po *QoS* karakteristikama;

- uvid u karakteristike realizovanog IPv6 saobraćaja.

Problemi koji se mogu detektovati na ovaj način su:

- pojave virusa u mreži (na osnovu velike količine saobraćaja koji se generiše u izlaznom ili ulaznom smeru, ili ka DNS, e-mail serverima i sl.);
- pojave DoS napada;
- zloupotrebe protoka (na primer, u vezi za youtube, facebook, torrent servisima i sl.);
- pristup zabranjenim sajtovima;
- pokušaji napada ili pristupa zaštićenim mrežnim uređajima;
- neželjena opterećenja linkova.

Primena NetFlow tehnologije ima sledeće prednosti:

- centralizovano prikupljanje podataka;
- može se koristiti već postojeća oprema;
- mogućnost jednostavnog konfigurisanja;
- mogućnost prikupljanja i drugih parametara u komunikaciji kao što su kašnjenje, varijacija kašnjenja, izgubljeni paketi (IPFIX);
- mogućnost upotrebe besplatnih aplikacija za prikupljanje *NetFlow* statistike.

Sa druge strane, primena navedene tehnologije ima i određene nedostatke:

- aplikacije nemaju direktnu mogućnost automatizovanog rešavanja problema (blokiranje komunikacije), zbog čega je potrebno uvođenje dodatnih alata;
- nakon nastanka problema pa do njegovog uočavanja može proći dosta vremena;
- mogu se prikupiti samo informacije do OSI L4 sloja;
- zahtevaju poznavanje mreže da bi se ispravno konfigurisao eksport podataka putem NetFlow protokola.

### 4.3 Prognoziranje saobraćaja

Planiranje mreže, posmatrano sa stanovišta karakteristika saobraćaja koje posmatrana mreža treba da zadovolji, zasniva se na pravilnoj proceni budućih saobraćajnih potreba. Dobijanjem rezultata merenja odgovarajućih parametara mreže, stiže se osnova za primenu metoda koje se odnose na prognoziranje saobraćaja.

#### 4.3.1 Prikaz saobraćajnih tokova – saobraćajna matrica

Efikasno planiranje mreže je zasnovano na upotrebi podataka o saobraćaju između dva čvora mreže. Pogodan oblik za prikazivanje vrednosti saobraćaja, je forma tzv. saobraćajne matrice koje sadrže podatke o saobraćaju (Tabela 10), [37],

Tabela 10. Primer saobraćajne matrice [37]

do \ od	1	$i$	$j$	$n$	$\Sigma D$
1	$A_{11}$			$A_{1n}$	$D_1$
$i$		$A_{ii}$	$A_{ij}$		$D_i$
$j$		$A_{ji}$	$A_{jj}$		$D_j$
$n$	$A_{n1}$			$A_{nn}$	$D_n$
$\Sigma O$	$O_1$	$O_i$	$O_j$	$O_n$	$A$

pri čemu su:

- Indeksi 1, 2, ...,  $i$ , ...,  $j$ , ...,  $n$  označavaju posmatrane čvorove u mreži;
- $A_{ij}$  predstavlja saobraćaj od  $i$  do  $j$ ;
- $A_{ji}$  predstavlja saobraćaj od  $j$  do  $i$ ;
- $A_{ii}$  predstavlja lokalni saobraćaj u posmatranom čvoru;
- $O_i$  je ukupan odlazni saobraćaj iz čvora  $i$ ;
- $D_j$  je ukupan dolazni saobraćaj u čvoru  $j$ .

Saobraćajna matrica predstavlja saobraćaj od tačke do tačke između dva čvora, koji mogu pripadati jednoj mreži ili različitim mrežama istog ili različitih nivoa. Matrice se mogu formirati kako za pojedinačne servise, tako i za određene nivoe agregacije.

Saobraćajne matrice mogu se efikasno koristiti prilikom rešavanja prognoziranja saobraćajnih zahteva. U tom smislu razvijeno je više efikasnih metoda koje se mogu koristiti, zavisno od tipa zadatka [37], [106].

Na osnovu primera saobraćajne matrice, prikazanog u Tabeli 10, može se videti da zbir vrednosti po kolonama  $\sum O$  daje ukupan saobraćaj  $A$ . Isti rezultat se dobija zbirom vrednosti  $D$ , odnosno sumom vrednosti po vrstama  $\sum D$ , na osnovu čega je [37]:

$$\sum O = \sum D = A. \quad (4.20)$$

Za rešavanje problema prognoziranja saobraćaja, neophodno je napraviti razliku između sadašnjeg saobraćaja  $A_{ij}(0)$  i procenjenog saobraćaja za neki budući vremenski period  $t$ , koji se označava kao  $A_{ij}(t)$  [37]. U okviru procesa prognoziranja kapaciteta posmatranih čvorova, neophodno je sprovesti postupak prognoziranja za svaku komponentu posmatranog sistema zasebno, ukoliko posmatrana komponenta ima uticaj na opsluživanje saobraćaja u posmatranom čvoru [37].

Postoje različite metode za procenu  $A_{ij}(t)$  zasnovane na očekivanom porastu broja korisnika mreže sa pripadajućim čvorovima  $i$  i  $j$ , očekivanim promenama saobraćaja po korisniku, itd. Pod korisnicima jednog čvora se podrazumevaju oni korisnici koje posmatrani čvor direktno opslužuje preko pripadajuće mreže (analogno centrali u slučaju telefonskog saobraćaja). Imajući u vidu činjenicu da različite kategorije korisnika iniciraju generisanje različite količine saobraćaja, moguće je da se procenjeni budući saobraćaj predstavi kao [27], [37]:

$$A(t) = N_1(t) \cdot \alpha_1 + N_2(t) \cdot \alpha_2 + \dots + N_n(t) \cdot \alpha_n \quad (4.21)$$

pri čemu  $N_i(t)$  predstavlja prognozirani broj korisnika kategorije  $i$  ( $i \in \{1, \dots, n\}$ ), dok  $\alpha_i$  predstavlja intenzitet saobraćaja po korisniku kategorije  $i$ . Ukoliko nije moguće razdvojiti korisnike u kategorije, budući saobraćaj se može jednostavno proceniti kao [27], [37]:



$$A(t) = A(0) \cdot \frac{N(t)}{N(0)} \quad (4.22)$$

gde je  $N(t)$  prognozirani broj korisnika za period  $t$ , a  $N(0)$  sadašnji broj korisnika.

### 4.3.2 Prognoza saobraćaja od tačke do tačke

Za procenu saobraćaja od jednog čvora do drugog, može se primeniti više modela. Potrebno je uzeti u obzir porast korisnika i primeniti težinske koeficijente koji odgovaraju ovom porastu, kao što je to prikazano u jednačini [27], [37]:

$$A_{ij}(t) = A_{ij}(0) \cdot \frac{W_i G_i + W_j G_j}{W_i + W_j} \quad (4.23)$$

$W_i$  i  $W_j$  su težinski koeficijenti, a  $G_i$  i  $G_j$  predstavljaju porast korisnika u čvorovima  $i$  i  $j$  respektivno. Porast broja korisnika u čvoru se predstavlja relacijama [27], [37]:

$$G_i = \frac{N_i(t)}{N_i(0)} \quad G_j = \frac{N_j(t)}{N_j(0)}. \quad (4.24)$$

Najčešće primenjeni model za određivanje težinskih koeficijenata  $W_i$  i  $W_j$  su:

- **I Rapp-ova jednačina** [27], [37], kod ovog modela se polazi od pretpostavke da će saobraćaj po korisniku od čvora  $i$  do čvora  $j$  biti proporcionalan broju korisnika u čvoru:

$$W_i = N_i(t) \quad W_j = N_j(t). \quad (4.25)$$

- **II Rapp-ova jednačina** [27], [37], koja podrazumeva da su promene polaznog i dolaznog saobraćaja po korisniku veoma male:

$$W_i = N_i(t)^2 \quad W_j = N_j(t)^2. \quad (4.26)$$

- **Australian Telecom jednačina** [37] usrednjavanjem saobraćaja po korisniku za sadašnji trenutak i budući period  $t$  dobija se modifikovana I Rapp-ova jednačina:

$$W_i = \frac{N_i(0) + N_i(t)}{2} \quad W_j = \frac{N_j(0) + N_j(t)}{2}. \quad (4.27)$$

### 4.3.3 *Kruithof*-ov metod dvostrukog faktora

*Kruithof*-ov metod pruža mogućnost procene buduće saobraćajne potrebe za svaku relaciju posebno u saobraćajnoj matrici ( $A_{ij}$ ), uz pretpostavku da su sadašnje vrednosti intenziteta saobraćaja poznate. Procedura ovog metoda podrazumeva prilagođavanje saobraćaja  $A_{ij}$ , tako da u budućem periodu odgovara sumama redova i kolona.  $A_{ij}$  se menja u  $A_{ij} \cdot S_1/S_0$ , gde  $S_0$  predstavlja postojeću sumu, a  $S_1$  novu sumu odgovarajućeg reda, ili kolone [27], [37]. Ukoliko se počne sa podešavanjem  $A_{ij}$ , sa osvrtnom na nove sume redova,  $S_j$ , ove sume će se slagati, ali sume kolona  $S_i$  neće. Sledeći korak predstavlja podešavanje tražene vrednosti  $A_{ij}$  sa sumom kolona. Ovo čini neslaganje sa sumom redova, tako da se u sledećem koraku podešavaju nove vrednosti za  $A_{ij}$  u odnosu na sume redova. Procedura se nastavlja sve dok se ne postigne odgovarajuća tačnost i za kolone i za redove. Svaka iteracija je veoma brza i daje u opštem slučaju zadovoljavajuće rezultate, najčešće posle tri iteracije [37]:

- **Iteracija 1: Množenje redova**

$$A_{ij}(1) = \frac{A_{ij}(0)}{A_i(0)} \cdot A_i(t) \quad (4.28)$$

- **Iteracija 2: Množenje kolona**

$$A_{ij}(2) = \frac{A_{ij}(1)}{A_j(1)} \cdot A_j(t) \quad (4.29)$$

- **Iteracija 3: Množenje redova**

$$A_{ij}(3) = \frac{A_{ij}(2)}{A_i(2)} \cdot A_i(t) \quad (4.30)$$

Osnovne karakteristike *Kruithof*-ovog metoda su [37]:

- *jedinstvenost* – postoji isključivo jedno rešenje za prognoziranje vrednosti,
- *reverzibilnost* – rezultujuća matrica se može transformisati u polaznu matricu reverzibilnim postupkom,
- *tranzitivnost* – rezultujuća matrica je nezavisna od perioda prognozirivanja,

- *invarijantnost* – promena broja komutacionih centara ne utiče na rezultat prognoziranja,
- *frakcijalnost* – veći komutacioni centar se može posmatrati kao više manjih komutacionih centara i obrnuto, sa zanemarljivo malim devijacijama u konačnom rešenju.

Kruithof-ov metod je primenljiv u slučajevima kada se ne očekuje značajnija promena proporcija između individualnih vrednosti saobraćaja  $A_{ij}$ , kao i u slučaju gde nije moguće drugačije prognozirati ove intenzitete [37].

#### 4.4 Osnovni principi dimenzionisanja

Prilikom dimenzionisanja sistema za pružanje telekomunikacionih servisa, neophodno je uravnotežiti zahteve za određivanje nivoa usluga sa utvrđenim ekonomskim ograničenjima. U opštem slučaju, karakterizacija saobraćaja u procesu planiranja, ima za cilj iznalaženje karakteristika planiranog sistema sa optimalnim odnosom ponuđenog saobraćaja, kapaciteta sistema i rezultiranog nivoa usluga. Ovakva vrsta ciljeva nalazi potporu u činjenici da za realizaciju planiranog sistema, postoje ograničena budžetska sredstva, kojima veoma često nije moguće (odnosno nije isplativo) realizovati sistem koji bi zadovoljio bilo koje nivoe zahteva vezanih za set posmatranih servisa.

Prilikom planiranja jedne mreže (ili određenog sistema, kao dela mreže), ukoliko postoji mogućnost, korisno je definisati tzv. deskriptore saobraćaja, koji se mogu koristiti kao ulazni podaci za procenu efikasnosti, kao i za dimenzionisanje posmatrane mreže/sistema [107]. Pod deskriptorima se podrazumevaju setovi saobraćajnih parametara grupisanih, na takav način, da mogu pojednostaviti primenu odgovarajućih matematičkih alata, dok sa druge strane unapređuju upotrebljivost dobijenih rezultata. Shodno navedenom deskriptori saobraćaja bi trebalo da ispunjavaju sledeće karakteristike [4], [107]:

- stabilnost – dati tokovi stacionarnog saobraćaja ne bi trebali imati parametre koji su promenljivi na dnevnom nivou;
- kompaktnost - poželjno je figurisanje što manjeg broja parametara;

- razumljivost - laka razumljivost prikazanih parametara je od velike važnosti;
- agregatizovanost - parametri kojima se superponiraju karakteristike dva ili više tokova treba da imaju i budu u što jednostavnijoj relaciji sa svakom od pripadajućih komponenti;
- skalabilnost - porast saobraćaja ne bi trebalo da rezultira kompleksnim promenama u odgovarajućim sistemima.

Kao primer, da bi pravilno funkcionisao jedan sistem koji se analizira preko odgovarajućeg modela za sistem gubitaka, on treba da bude tako dimenzionisan da u njemu figuriše niska vrednost verovatnoće zauzeća svih resursa (kanala). U praksi bi trebalo odabrati broj kanala  $n$  tako da se  $E_n(A)$  nalazi u granicama 1-5% da bi se izbeglo preopterećenje usled velikog broja mnogih neuspelih i ponovljenih zahteva, gde obe vrste ulaze u posmatrani sistem i osim navedenog prouzrokuju nezadovoljstvo korisnika. Ako se Erlangova B-formula primenjuje sa fiksnom verovatnoćom zauzetosti svih kanala, onda se u procesu dimenzionisanja grupe kanala, poput  $VLAN^{14}$   $trunk^{15}$ -ova (nadalje,  $trunk$ -ova), treba rukovoditi sledećim principima [25]:

- za datu verovatnoću zauzetosti svih kanala, iskorišćenje po kanalu treba da bude najveće za velike  $trunk$ -ove, kao i veoma malo u slučaju malih  $trunk$ -ova;
- veliki  $trunk$ -ovi su osetljiviji na dato preopterećenje od malih; ovo se može objasniti malim stepenom zagušenja u malim grupama virtuelnih linkova, kojima na raspolaganju stoji veći kapacitet.

Imajući u vidu konfliktnu prirodu navedenih principa, njihovo uvažavanje ima posebnu važnost prilikom dimenzionisanja grupacija virtuelnih linija. U prethodno navedenim sekcijama, moglo se videti da se karakterizacija saobraćaja, po pravilu, vrši uspostavljanjem modela koji aproksimiraju stohastično ponašanje saobraćajnih tokova. Pri tome se teži ka upotrebi, što je moguće, manjeg broja statističkih parametara saobraćaja (npr. srednja vrednost, varijansa, itd.), sa ciljem dobijanja relevantnih

---

<sup>14</sup>  $VLAN$  – Virtuelna lokalna mreža – deo fizičke mreže koja, na osnovu logičke podele na OSI sloju 2, funkcioniše kao izdvojena mreža.

<sup>15</sup>  $trunk$  - grupacija virtuelnih linija, koje zajednički dele isti fizički link.

karakteristika saobraćajnog toka [4]. Drugim rečima, usvajanjem odgovarajućih pretpostavki (baziranih na inženjerskim iskustvima), teži se uprošćavanju primenjenih modela sa ciljem povećanja efikasnosti analitičkih postupaka i smanjenja uticaja konfliktnih faktora.

Imajući u vidu ekonomska ograničenja, kao i primenu odgovarajućih modela gubitaka, u slučaju proširenja resursa, poželjna je i primena tzv. Moovog principa nadgradnje, koji se u najkraćim crtama može opisati na sledeći način [25]: *ako zamenimo parametar fiksne verovatnoće zauzetosti svih kanala sa ekonomskim zahtevima, onda funkcija proširenja resursa  $F_n(A)$  treba da preuzme fiksnu vrednost, na takav način, da proširenje posmatrane grupe kanala sa dodatnim kanalom, povećava nivo opsluženog saobraćaja podjednako po svakom kanalu, individualno posmatrano.* Benefit proširenja resursa, na osnovu primene navedenog principa, može se evaluirati kroz sledeći odnos [4]:

$$F_B = \frac{c}{g} = \frac{\text{trošak\_instalacije\_dodatnog\_kanala}}{\text{prihodi\_nastali\_od\_instalacije\_dodatnog\_kanala}} \quad (4.31)$$

Promenljiva  $F_B$  se naziva „vrednost proširenja“.

Uvek, kada postoji mogućnost, neophodno je vršiti odgovarajuća merenja, u cilju validacije primenjenih saobraćajnih modela i provere usklađenosti sa primenjenim inženjerskim metodama i principima.

#### 4.4.1 Kontrolisanje preopterećenja mreže

Prilikom planiranja/dimenzionisanja kapaciteta jedne mreže (ili posmatranog dela mreže), potrebno je imati uvid u one karakteristike, koje mogu biti u vezi sa kontrolom opterećenja. U navedenom kontekstu, mogu se izdvojiti sledeći principi [4]:

- Mogućnost konvergencije ka onom stanju, kojim se maksimizira propusnost preopterećenog resursa, pod uslovom da se zadrži takvo vreme odziva na zahtev korisnika koje je dovoljno kratko da redukuje mogućnost odustajanja od zahteva. Konvergencija se u ovom slučaju odnosi na set scenarija, u kojima figurišu posmatrani izvori saobraćaja i posmatrani mrežni/sistemske resursi sa

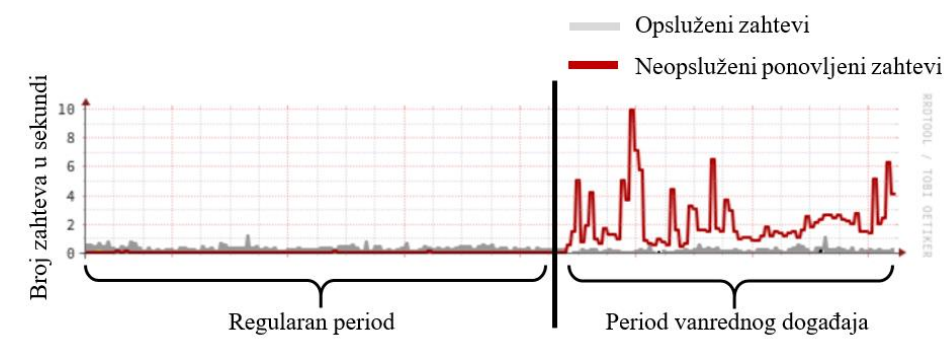
svojim kapacitetima. Proces konvergencije bi trebalo da ima automatski karakter.

- Minimiziranje neefikasnih saobraćajnih tokova, kroz mehanizam identifikacije i selektivne redukcije tokova sa navedenom karakteristikom.
- Formiranje uslova kojima se pruža mogućnost podjednagog iskorišćenja saobraćajnih tokova.

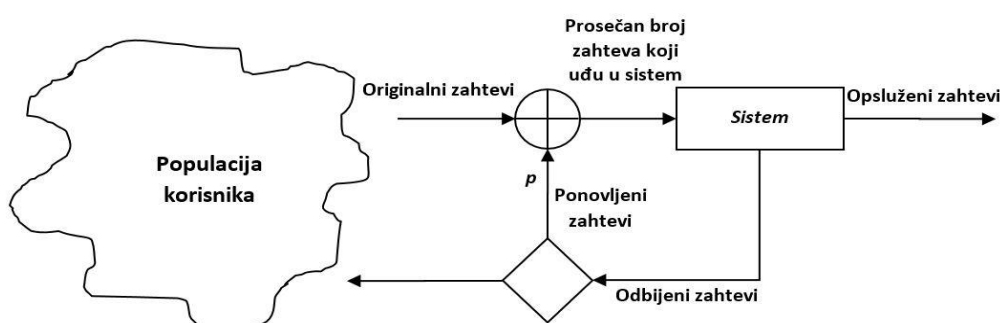
Situacije, koje uzrokuju pojavu preopterećenja, obično su povezane sa ponašanjem korisnika i bivaju stimulisane narednim vrstama događaja [4]:

- medijski događaji (akcije na društvenim mrežama, takmičenja, marketinške akcije);
- vanredne situacije;
- greške/otkazi mrežne opreme, uključujući greške u softveru/konfiguraciji (utičući na pojavu pokušaja rekonekcije u konekciono orjentisanim sesijama, poput TCP sesija);
- automatski zakazane sesije (npr. backup podataka), kao i određene vrste napada na infrastrukturu i servise (poput *Denial-of-service* napada).

U odsustvu efikasnih mehanizama kontrole ovakvi događaji bi kroz preopterećenje, ugrozili stabilnost mrežnih sistema i izazvali ozbiljno smanjenje nivoa usluga. U najgorem scenariju, bio bi moguć i pad sistema odnosno određeni servis ne bi bio dostupan korisnicima. Imajući u vidu činjenicu, da su krajnji korisnici često nestrpljivi, oni ponovnim pokušajem generišu nove zahteve (već posle nekoliko sekundi), ili odmah (ili nakon naknadnog pokušaja) odustaju od servisa. Nestrpljivost korisnika, u kombinaciji sa prekomerno dugim vremenom odziva sistema, može dovesti do toga da efektivna propusnost mrežnog resursa opadne na veoma nizak nivo, usled dovoljno visokog nivoa zahteva (Slika 47). Ovakav scenario se javlja u situaciji, kada resursi više troše svoje kapacitete na delimičnu obradu zahteva, ali ne i na potpunu obradu [4]. Ovakav princip ponašanja je osnova funkcionisanja i *Denial-of-service* napada, koji dovode ciljanu infrastrukturu do istog rezultujućeg stanja. Navedeni scenario je prikazan na Slici 48 [4].



Slika 47. Primer broja opsluženih i neopsluženih (ponovljenih) zahteva iz realnog okruženja



Slika 48. Dijagram multipliciranja korisničkih zahteva [4]

Model multipliciranja korisničkih zahteva je opisan je na sledeći način [4]:

- Neka je  $p_i$  - verovatnoća istrajnosti (upornosti), tj. verovatnoća da će se napraviti novi pokušaj ako se  $i$ -ti pokušaj ne servisira.
- Neka je poznata raspodela vremenskog intervala između  $i$ -tog i  $(i+1)$ -vog pokušaja.
- Ako svi pokušaji propadnu, onda se srednji broj ponovnih pokušaja nakon inicijalne namere može prikazati nizom  $1 + p_1 + p_1(p_2 + p_1(p_2(p_3 + \dots$
- Ako za svako  $k$  važi da je  $p_k = p$ , tada se navedeni niz množi sa  $(1 - p)^{-1}$ . Kao primer, pretpostavimo da je  $p=80\%$  (što se primećuje za neke medijske stimilirane događaje, npr. „Teleton“ događaji). Tada se, u proseku, može uočiti pet pokušaja po originalnoj nameri za uspostavljanje veze (ako svi pokušaji propadnu). Iako je to jednostavan primer, on pokazuje fenomen koji rezultuje drastičnim povećanjem broja zahteva na određenom resursu. Drugim rečima,

upornost korisnika može dovesti do značajno većeg opterećenja resursa, koje nadalje, može prouzrokovati preopterećenja u drugim delovima mreže, usled ne oslobađanja resursa koji teže da uspešno opsluže zahteve, do kraja iniciranih sesija [4].

Imajući navedeno u vidu, uvodi se sledeća notacija [4]:

$p$  – upornost korisnika

$B$  – verovatnoća da sesija nije kompletirana (npr. čeka se odziv na drugoj strani komunikacije)

$A$  - ponuđeni saobraćaj

$A_c$  – opsluženi saobraćaj

$(1-B)$  - verovatnoća vremena opsluživanja nakon uspelog inicijalnog (prvog) pokušaja:  $s$

$(1-B) \cdot B \cdot p$  - verovatnoća vremena opsluživanja nakon uspelog drugog pokušaja:  $t+s$

$(1-B) \cdot (B \cdot p)^2$  - verovatnoća vremena opsluživanja nakon uspelog trećeg pokušaja:  $2 \cdot t+s$

...

$(1-B) \cdot (B \cdot p)^i$  - verovatnoća vremena opsluživanja nakon uspelog  $i$ -tog pokušaja:  $i \cdot t+s$

Shodno navedenom, prosečno vreme zauzetosti je predstavljeno odnosom:

$$T = \frac{(1-B) \cdot (t + s \cdot (1-B \cdot p))}{(1-B \cdot p)^2} . \quad (4.32)$$

Opsluženi saobraćaj, u ovom modelu, može predstaviti izrazom [4]:

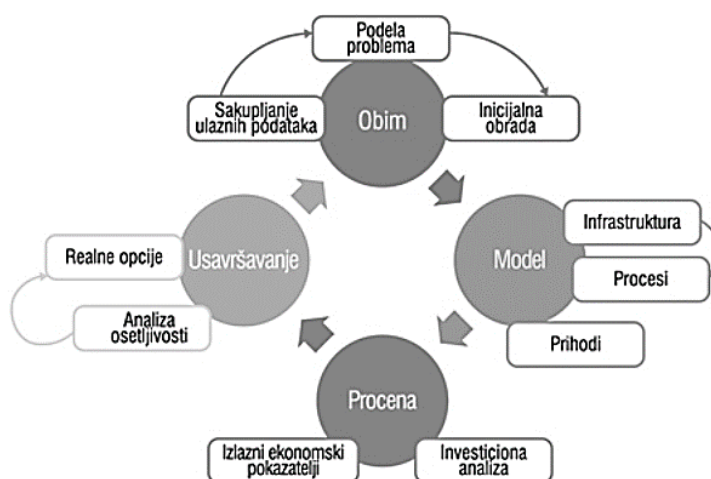
$$A_c = A \cdot (1-B) \cdot \left( \frac{t/s + 1 - B \cdot p}{(1-B \cdot p)^2} \right) . \quad (4.33)$$



Navedeni rezultat pokazuje da je opsluženi saobraćaj uvećan u odnosu na prvobitno ponuđeni saobraćaj, koji zapravo figuriše u procesu dimenzionisanja. Kako bi se sprečilo smanjenje broja izvršenih usluga, preporučuje se sprovođenje pogodnog oblika tehničkih mera, sa ciljem kontrole opterećenja. Ove mere se odnose na mehanizam inicijalne obrade svakog zahteva, koji je potrebno postaviti na „spoljnu“ stranu resursa, identifikovanog kao „usko grlo“. Da bi kontrola preopterećenja bila efikasna, ona mora biti automatska i ugrađena u mrežni resurs, sa zadatkom da dovoljno brzo reaguje na promene broja zahteva ili kapacitetu resursa. Pored toga, posmatrani mehanizam mora biti u stanju da se suoči sa varijacijama u miksu različitih zahteva i da adekvatno raspodeli zahteve ka odgovarajućim resursima. Posmatrano sa stanovišta planiranja mreže, evidentno je da treba uvesti *QoS*, gde svi parametri moraju biti koordinisani u skladu sa ciljevima, vezanim za različite tipove zahteva. Takve smernice se reflektuju kroz definiciju *QoS* klasa servisa, koje bi trebale biti u skladu sa SLA uslovima [4].

## 5 TEHNO-EKONOMSKI PRISTUP PROCESU PLANIRANJA

Pri donošenju odluke o izgradnji ili proširenju postojećih telekomunikacionih mreža, operatori se suočavaju sa izazovima koji se ogledaju u njihovoj mogućnosti da se prilagode trenutnim uslovima na tržištu, zahtevima korisnika, regulatornim okvirima, savremenoj tehnologiji, itd. [108]. Tehno-ekonomski pristup procesu planiranja, odnosi se na skup aktivnosti koje se realizuju u četiri faze [6]: *definisanje obima planiranja za potrebe formiranja tehno-ekonomskog modela, razvoj tehno-ekonomskog modela, evaluacija tehno-ekonomskog modela i korekcija tehno-ekonomskog modela*. Ovaj uopšteni ciklični pristup baziran je na tzv. *Plan-Do-Study-Act* konceptu [109], [110]. Cikličnost se smatra ključnom osobinom u navedenom pristupu, bez koje nije moguća primena odgovarajućih biznis modela (Slika 49).



Slika 49. Tehno-ekonomski pristup u planskim aktivnostima - ciklični pristup [108]

Inicijalna faza, odnosno definisanje obima planiranja za potrebe formiranja tehno-ekonomskog modela, vezana je za prikupljanje ulaznih podataka koji se odnose na odgovarajuće faktore (kao što su: tehnologije, tržišta, ciljne grupe korisnika i dr.), na bazi kojih se vrši podela problema planiranja na odgovarajuće domene planiranja. Tipični domeni planiranja mogu se odnositi na vremenski okvir (dugoročno, srednjoročno i kratkoročno), segment mreže (pristupna mreža, agregirani saobraćaj, jezgro mreže, saobraćaj od tačke do tačke i sl.), geografsko područje (grad, država,

region i sl.), mrežnu tehnologiju, strukturu servisa, nivo detaljnosti (strateško, poslovno planiranje) i dr. U ovom koraku vrši se i inicijalno procesiranje prikupljenih podataka, na takav način da se mogu identifikovati odgovarajući servisi, mogući biznis modeli, kao i vrste tehnologija koje se kandiduju za implementaciju [6].

U drugoj fazi vrši se razvoj tehno-ekonomskog modela što podrazumeva oblikovanje troškovnih i profitnih modela. Prilikom razvoja navedenih modela, moguće je primeniti dva pristupa, tzv. top-down i bottom-up. Za odabrani model, definiše se nivo detalja koje treba uzeti u obzir prilikom definisanja cost-benefit modela, tržišnih činilaca, strukture servisa i dr. [6].

Treća faza predstavlja evaluaciju tehno-ekonomskog modela, definisanog u prethodnom koraku, a na bazi podataka, prikupljenih u prvom koraku. Analiza planiranih investicija obično se bazira na primeni klasičnih tehnika odlučivanja u domenu investicija, poput vremena obrta uloženog kapitala, Povratne stope investicije (*return on investment*, ROI), neto sadašnje vrednost (*net present value*, NPV), kao i interne stope prihoda (*internal rate of return*, IRR). Po pravilu se vrši poređenje nekoliko modela, predstavljenih u formi alternativa, analizirajući ih u skladu sa identifikovanim činiocima na tržištu [6].

Poslednja, četvrta faza, odnosno tzv. korekcija tehno-ekonomskog modela odnosi se na primenu analize osetljivosti, odnosno analizu ponašanja modela u odnosu na promene parametara. Na osnovu izvršenih analiza vrši se korekcija samog modela, sa ciljem uvećanja nivoa fleksibilnosti na parametarski definisane promene [6].

## **5.1 Definisanje obima planiranja za potrebe formiranja tehno-ekonomskog modela**

Definisanje obima planiranja za potrebe formiranja tehno-ekonomskog modela predstavlja fazu aktivnosti kojima se analiziraju ciljevi procesa planiranja modela, kao i načini na koje će se oni dostići. Proces planiranja se ne može uspešno realizovati ukoliko ne postoje kvalitetni ulazni podaci. Zbog toga, ove aktivnosti uključuju dva paralelna procesa, 1) definisanje tipova potrebnih ulaznih podataka, određivanje izvora podataka, definisanje načina njihovog prikupljanja i 2) podelu problema planiranja na

manje celine, na osnovu prostornih, vremenskih i/ili funkcionalnih kriterijuma. Podela se radi na osnovu dostupnih podataka, a u skladu sa postavljenim ciljevima [6].

Jedan od najbitnijih zadataka koji se realizuje u ovoj fazi je određivanje vremenskog okvira planiranja (dugoročno, srednjoročno i kratkoročno), koji je u skladu sa zahtevanim nivoom detaljnosti. Odnos veličine horizonta planiranja i zahtevanog nivoa detaljnosti može se posmatrati i kao jedan vid pouzdanosti planskih dokumenata (Glava 2). Naime, duži horizonti planiranja nose sa sobom veću neizvesnost, jer su više izloženi riziku od pojave akumuliranih grešaka [6].

### 5.1.1 Prikupljanje ulaznih podataka

Prikupljanje odgovarajućih ulaznih podataka za realizaciju procesa planiranja je veoma složen zadatak. Za formiranje ulazne baze podataka, neophodno je prikupiti:

- statističke podatke koji se odnose na telekomunikaciono tržište; to su podaci o broju korisnika telekomunikacionih usluga, strukturi ponuđenih servisa, strukturi različitih operatora i provajdera usluga i sl.
- podatke koji se odnose na stanje razvijenosti tehničko-tehnoloških resursa mreže; informacije o stanju aktuelnih i budućih tehnologija, strukturi ponuđenih servisa i primenjenih tehnologija, procene uticaja industrijskog sektora na domen telekomunikacionog tržišta i dr. [6].

Shodno navedenom, problem planiranja se može segmentirati na grupe podproblema [6], [111], koje se definišu prema strukturi prikupljenih podataka na:

- *Područja, korisnici i servisi* – identifikacija različitih klasa korisnika (na primer, rezidencijalni ili poslovni), kao i strukture servisa po određenim saobraćajnim područjima. Formiranje klastera koji uključuju fizičku lokaciju korisnika, potencijal tržišta kao i iskorišćenost postojeće telekomunikacione opreme [6];
- *Tehnologije, troškovi i prihodi* – jedan od važnih aspekata u procesu planiranja je i izbor tehnologije, koja će biti zastupljena u planiranom periodu. Izbor novih tehnologija u velikoj meri zavisi od strukture korisnika i zastupljenih servisa, aktuelnosti postojećih tehnologija,

prisutnih operatora na tržištu, veličine područja, regulatornih okvira, itd. U zavisnosti od odabrane tehnologije mogu se proceniti troškovi, kao i projektovati potencijalni prihod operatora mreže.

Svi prikupljeni podaci mogu se klasifikovati prema nivou uticaja i uključivati po kategorijama, u zavisnosti od traženog nivoa detaljnosti planiranja [6].

## 5.2 Razvoj tehno-ekonomskog modela

Razvoj tehno-ekonomskog modela predstavlja fazu planskih aktivnosti, koja se može razlikovati po pristupu, kao i po nivou detaljnosti. Detaljnost planskog modela, može biti predefinisana (posmatrano sa stanovišta strukture troškova), ali je u velikoj zavisnosti i od količine ulaznih podataka, koji su dostupni u procesu planiranja. Imajući to u vidu, planiranje mreže, posmatrano sa tehno-ekonomskog stanovišta, može se realizovati primenom dva pristupa [112].

- **Top-Down** pristup uzima u obzir stanje postojeće mrežne infrastrukture, polazeći od pretpostavke da su postojeći kapaciteti pravilno dimenzionisani. Troškovi, koji se odnose na opremu koja pripada postojećoj infrastrukturi se, na početku, posmatraju na novou celokupne mreže ili telekomunikacione kompanije, da bi se u narednim koracima dodelili onim elementima mreže koji služe za realizaciju pojedinačnih servisa. Za realizaciju ovog pristupa, koriste se tri troškovna modela: HCA (*Historical Cost Accounting*), CCA (*Current Cost Accounting*) i MEA (*Modern Equivalent Asset*). HCA metod posmatra troškove nabavke sredstava kao knjigovodstvenu vrednost, uzimajući u obzir amortizaciju [112]. Pošto ovaj metod računa sve istorijske troškove, on se ne može koristiti za optimizaciju mreže. Alternativa navedenom modelu je CCA model, kojim se vrši vrednovanje opreme, na osnovu njene tržišne vrednosti u posmatranom trenutku. Imajući u vidu činjenicu da tokom vremena nije moguće pronaći identične komponente na tržištu, ovaj model se može supstituisati MEA modelom, kojim se troškovi opreme procenjuju preko cene nove tehnologije koja nudi istu (ili veću) funkcionalnost u odnosu na onu, koja je trenutno primenjena. Ovaj metod je koristan pri planiranju brown-field investicija [112].

- **Bottom-up** pristup, nasuprot prethodno navedenom, polazi od nivoa zahteva za pojedinim servisima. Mreža se dimenzioniše sa ciljem da na optimalan način opsluži sve zahteve korisnika pojedinačno po servisu, sa predefinisanim nivoom kvaliteta. Troškovi svih servisa se potom sabiraju prema tipovima i količini neophodnih elemenata mreže [112]. Ovaj metod je pogodan za identifikaciju troškova prilikom planiranja *green-field* investicija, kao i za izradu komparativnih troškovnih analiza sa postojećom mrežom (sa identičnim setom servisa). U ovom slučaju, pogodno je koristiti model FLC (*Forward Looking Cost*), gde se uzimaju u obzir prognozirani troškovi opreme koji pripadaju novim tehnologijama (u slučaju *green-field* investicija) ili sa postojećim tehnologijama (u slučaju komparativnih analiza za potrebe *brown-field* investicija) [112].

U oba navedena pristupa, troškovi se klasifikuju na – kapitalne troškove (CapEx) i operativne troškove (OpEx). Kapitalni troškovi se mogu definisati kao troškovi neophodni za izgradnju ili razvoj (unapređenje) objekata, infrastrukture i opreme [112]. Za kapitalne troškove je karakteristično da gube vrednost tokom vremena. Sa druge strane, operativni troškovi se mogu definisati kao vrsta troškova koja se generiše tokom eksploatacije mreža i servisa i za njih nije karakterističan drastičan pad tokom vremena [112].

### **5.2.1 Klasifikacija tehno-ekonomskih modela zasnovana na potrebnom nivou detalja**

Radi poboljšanja planskih modela, unutar Demingovog ciklusa, [6] predlaže se klasifikacija modela zasnovana na potrebnom nivou detalja na:

1. frakcione modele,
2. modele zasnovane na inicijatoru,
3. namenske modele za dimenzionisanje, među kojima su:
  - a. modeli za dimenzionisanje mreža/infrastrukture,
  - b. modeli za dimenzionisanja procesa.

Opšti oblik modeliranja obuhvata frakcione modele, kao i modele zasnovane na inicijatoru, dok namenski modeli omogućavaju detaljnije modeliranje mreže (odnosno infrastrukture), kao i procesa. Važno je napomenuti da se prilikom formiranja obimnih tehnno-ekonomskih modela može kombinovati primena različitih tipova modela iz ove klasifikacije [6].

#### 5.2.1.1 Frakcioni modeli

Frakcioni modeli se zasnivaju na klasifikaciji i grupisanju troškova, prema veličini i važnosti na tzv. komponente troškova. Manje komponente troškova se izražavaju u procentualno u odnosu na veće komponente troškova. Naime, ukoliko se planira proširenje kapaciteta i uvođenje novih tehnologija, tada se, pored troškova investicija u navedenu opremu (koji predstavljaju „veću“ komponentu troškova), moraju planirati i dodatni troškovi održavanja takve opreme, nabavka potrošnog materijala, zamenskih delova i sl. [6]. Ovakva vrsta troškova predstavlja manju komponentu troškova, koja se u ovom primeru na godišnjem nivou može modelovati kao 20% početnog troška investiranja u opremu za proširenje kapaciteta. Drugi primeri su: troškovi koji nisu specifični za telekomunikacije (upravljanje i održavanje zgrada, itd.), administrativni troškovi za povezivanje novih ili isključivanje starih korisnika sa mreže, određivanje cena i fakturisanje (obično modelovano kao procenat prihoda) i dr. [6].

Nedostatak ovog modela se sastoji u tome što model ne sadrži informacije o izvoru i projekcijama troškova. Shodno navedenom, ovaj model nije prikladan za formiranje projekcija troškova na makro nivou velikih kompanija, naročito u slučaju značajnih razlika u ovakvim troškovima prilikom analiza između alternativnih tehnologija i sl. [6].

#### 5.2.1.2 Modeli zasnovani na inicijatoru

U modelima zasnovanim na inicijatoru, koristi se jedan ili više identifikovanih izvora troškova, koji se nazivaju *inicijatorima*. U ovakvim modelima izračunavaju se ili procenjuju ukupni troškovi ili jedan deo troškova. Za vrstu troška, koji je vezan za *inicijatora*, karakteristično je da takav trošak ne postoji (ne figuriše u opštem troškovnom modelu), do momenta kada njegov nastanak biva „iniciran“ zahvaljujući nekom postupku *inicijatora*. Shodno navedenom, model zasnovan na inicijatoru

predstavlja funkciju troškova u kojoj *inicijator* figuriše kao parametar i gde ukupan trošak zavisi od ovog parametra. Treba napomenuti da u ovakvim modelima figurišu i ostale vrste troškova, poput fiksnih. Model zasnovan na inicijatoru se može pojasniti kroz primer službi *call*-centra i helpdesk-a, čiji su se troškovi prema ovom modelu odnose na broj klijenata, koji predstavljaju *inicijator* troškova [6]. U proračunima se smatra, da će jedan klijent dovesti do (statistički utvrđeno) 1.9 poziva godišnje i da će ukupan operativni trošak operatora vezanih za taj poziv iznositi u proseku 11 novčanih jedinica. Kao takvi, troškovi *call*-centra i helpdesk-a mogu se izračunati na osnovu stvarnog broja klijenata za svaku godinu. Pored navedenog, može se koristiti i detaljniji model, gde će troškovi službe helpdesk-a zavisiti više od novih korisnika usluga, jer je procenjeno da će ta populacija imati više problema na početku korišćenja neke usluge. Dakle, u ovom slučaju postoje dva *inicijatora*, postojeći klijenti i novi korisnici usluga, pa se na osnovu toga, modifikuje i funkcija za izračunavanje troškova. Model zasnovan na inicijatoru može lako u sebe implementirati i druge tipove modela, proglašavanjem određenih entiteta (koji figurišu u uključenim modelima) za *inicijatore*, i pogodnim prilagođavanjem funkcije troškova. Zbog toga je ova vrsta modela izrazito fleksibilna i skalabilna, jer lako može da asemblira druge troškovne modele, pa je pogodna za upotrebu u procesima planiranja [6].

### 5.2.1.3 Namenski modeli za dimenzionisanje

- *Dimenzionisanje mreže*

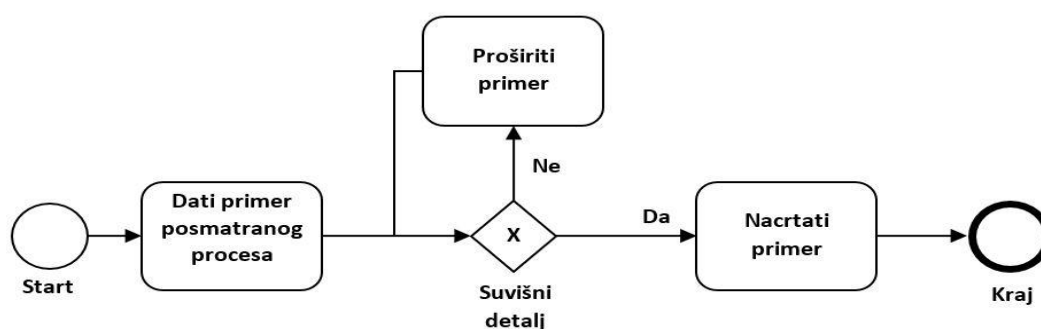
Cilj primene modela za dimenzionisanje mreže, posmatrano sa tehnno-ekonomskog stanovišta, odnosi se na određivanje (identifikaciju) opreme, neophodne za realizaciju planiranih servisa, tehnologija i pripadajućih funkcionalnosti u okviru posmatrane telekomunikacione mreže. Iako ovakva vrsta kalkulacija može da se svede na jednostavne postupke, kojima se proračunava neophodna količina i specifikacija opreme i materijala, neophodno je težiti ka ispunjavanju uslova koje zahteva generalno infrastrukturno rešenje. Treba imati u vidu da rezultati dobijeni na ovakav način ne moraju da reflektuju i najefikasniju upotrebu posmatrane mrežne infrastrukture [6]. Takođe, različite vrste mrežnih arhitektura rezultuju različitim topologijama, gde svaka pojedinačno ima specifičnu troškovnu strukturu. Zbog toga je neophodna primena tehnika za optimizaciju, poput tehnike Štajnerovog drveta-a (npr. za pronalaženje





Primena navedenog principa, tek na kraju dozvoljava izračunavanje stvarnih troškova infrastrukture, stvaranjem troškovne specifikacije ili *liste „materijala“* (tzv. *Bill-of-Material*, BoM), koja sadrži kompletnu listu opreme koja bi trebala biti instalirana kako bi se obezbedila planirana funkcionalnost mreže. Tehno-ekonomski aspekt dimenzionisanja mreže treba da vodi računa o odosu broja korisnika i količine opreme (na nivou ukupne investicije), čime se utiče na količinu neophodne opreme dobijenu određivanjem optimalnog broja korisnika po jedinici opreme. Takođe, treba voditi računa o ekonomskim efektima dodavanja usluga na postojećoj mreži. Na primer, ukoliko je korisniku već dostupna internet veza, koliki se ekonomski efekat postiže, ukoliko se, po što nižim troškovima za operatora, korisniku ponudi dodatna brzina [6].

Dimenzionisanje procesa je namenski pristup, usmeren na modeliranje troškova uzrokovanih ponavljanjem realizacije „ne-trivijalnih“ procesa. Ovaj set postupaka započinje prikupljanjem i dokumentovanjem informacija o svim procesima, koji se realizuju ili bi trebalo da budu realizovani. Postoje različiti tipovi modeliranja, kao i odgovarajućih tehnika, koje se mogu koristiti u ovom slučaju. U [6] je preporučeni model pristupa zasnovan na dijagramu toka (Slika 52), jer omogućava formiranje dokumentacije sa dovoljnim nivoom detalja, kao i intuitivnu razumljivost za čitaoce koji nisu upućeni u specifičnu problematiku. Prikaz se vrši u standardizovanom formatu BPMN (*Business Process Modeling Notation*) [113], uz korespondentni tekstualni format tipa XSPDL (*XML Process Definition Language* [114]) [6]).



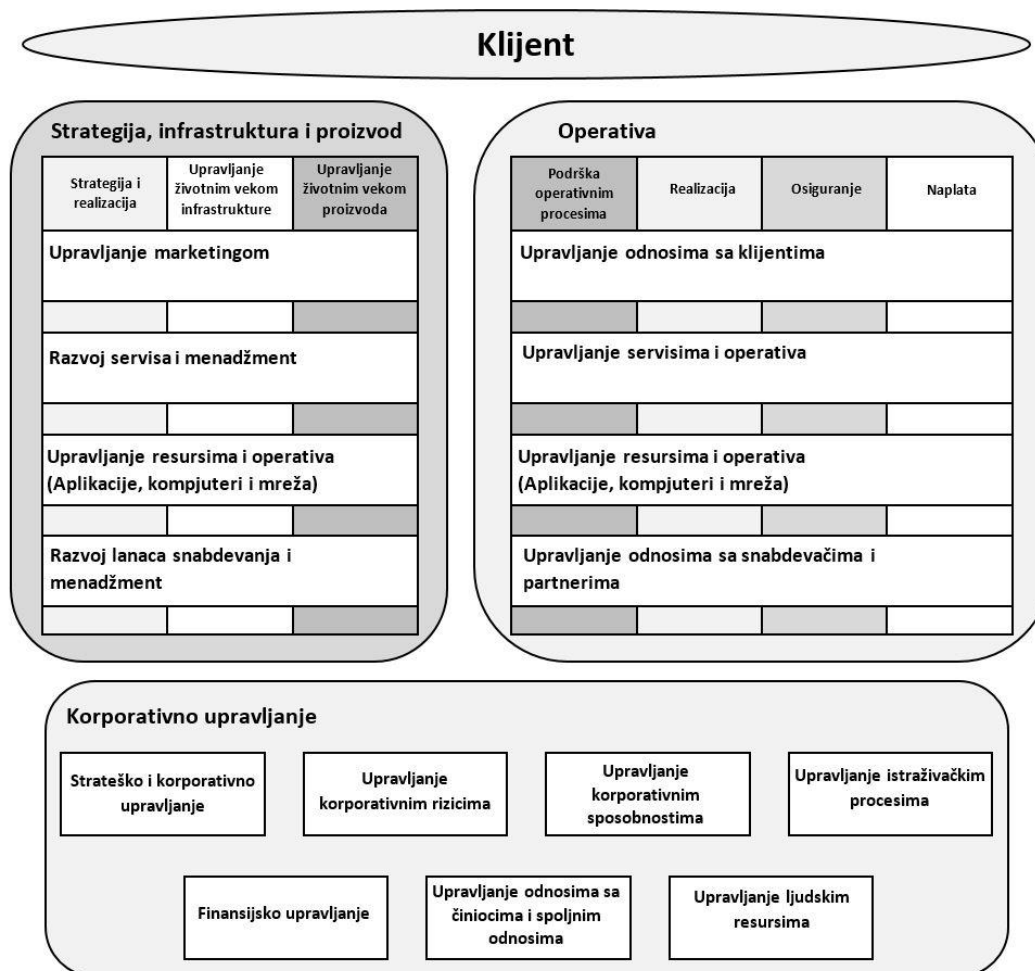
Slika 52. Primer prikaza procesa, dijagramom toka sa BPMN notacije [6]

Kada je proces adekvatno dokumentovan, troškovi izvršenja ovog procesa mogu se proceniti primenom tehnike identifikacije troškova baziranih na aktivnostima (*Activity Based Costing*, ABC) [115]. Geometrijski oblici na dijagramu imaju sledeća

značenja: svaki pravougaonik na dijagramu predstavlja zadatak koji se dodeljuje osobi ili timu. Svaki dijament u dijagramu predstavlja uslovni korak, sa podelom više tokova, vezanih za izvršenje narednih koraka [6]. Dodeljivanjem odgovarajućih troškova svakom od zadataka, poput vremena za realizaciju i/ili resursa koje se troše prilikom izvršavanja tog zadatka, kao i verovatnoćama da će u uslovnim koracima biti primenjena određena odluka, stvara se mogućnost primene odgovarajućih analitičkih metoda za procenu troškova, nastalih kao rezultat realizacije posmatranog procesa. Nivo detaljnosti u procesu dokumentovanja procesa, u kombinaciji sa naprednim računskim i simulacionim pristupima, pored navedenog može dati i dodatne informacije, poput detekcije „uskih grla“ i/ili zadataka koji se ni u jednom slučaju ne mogu izvršiti (*deadlocks*), itd. [6].

Primer softverskog rešenja koji se bavi ovom problematikom je eTOM (*The enhanced Telecom Operations Map*) [116], razvijen od strane *TeleManagement Forum*-a (TMF). To je okvir poslovnih procesa odnosno referentni model za kategorizaciju svih poslovnih aktivnosti operatora ili servis provajdera, grupisanih u odgovarajuće podprocese (Slika 53) [6]:

- Strategija, infrastruktura i proizvod, obuhvata planiranje i upravljanje životnim ciklusom infrastrukture i proizvoda;
- Operacije, koje pokrivaju centar operativnog upravljanja;
- *Enterprise Management*, daje podršku korporativnom ili poslovnom menadžmentu.



Slika 53. Struktura modelovanja procesa sa eTOM platformom [6]

Platforma eTOM je standardizovana od strane Međunarodne unije za telekomunikacije (ITU-T M.3050) [117]. eTOM je fokusiran na poslovne procese, veze između procesa, identifikaciju interfejsa, korišćenje informacija o korisnicima, servisima, resursima, partnerima, ponuđačima od strane više procesa i dr.

## 5.2.2 Modeli za procenu pada cena opreme tokom vremena

Praksa je pokazala da cena mrežne opreme, koja pripada određenoj tehnologiji, opada tokom vremena. Za ovakvo ponašanje cena postoji nekoliko razloga. Rast proizvodnje određenog proizvoda utiče na pad njegove jedinične cene. Takođe, razvoj nauke i tehnologije utiče na smenu tehnologija – aktuelna generacija tehnologija postaje manje atraktivna, i vremenom se zamenjuje novijom i atraktivnijom generacijom [6].

### 5.2.2.1 Koncept „krive iskustva“

Koncept tzv. „krive iskustva“ je jedna od tehnika za prognoziranje pada jedinične cene mrežne opreme, koja nastaje sa porastom količine proizvedenih jedinica tokom vremena. Ova tehnika je nastala na bazi Wright-ovog empirijskog zakona [118], koji u prevodu glasi “Svaki put kada se duplira akumulirana količina proizvedenih jedinica jednog proizvoda, jedinična cena tog proizvoda opadne za konstantan broj procenata“ Ovo se može predstaviti formulom (5.1), kao i njenom modifikacijom (5.2), gde je cena izražena kao funkcija, koja zavisi od obima proizvodnje  $Q$ .

$$C_{2n} = K \cdot C_n \quad (5.1)$$

$$C_Q = C_0 \cdot Q^b \quad (5.2)$$

Gde u:  $C_{2n}$  – jedinična cena proizvoda dopijena po dupliranju količine proizvedenih jedinica ( $n$ ),  $C_Q$  - trošak nastao u slučaju  $Q$ -te proizvedene jedinice;  $C_0$  - cena prve proizvedene jedinice;  $K$  je stopa logističke krive ili faktor smanjenja troškova;  $b = \log_2 K$  ima negativnu vrednost, jer kumulativno povećanje proizvodnje smanjuje troškove. Ako je apsolutna vrednost  $b$  velika, trošak pada brže sa kumulativnim povećanjem proizvodnje [6]. Treba napomenuti da je u ovom slučaju nivo troškova ekvivalentan nivou cena na tržištu. Povećanje proizvedenih količina može biti posledica većeg stepena penetracije posmatrane opreme (proizvoda) na tržištu [6].

### 5.2.2.2 Kriva logističkog rasta

Kriva logističkog rasta se koristi za izražavanje nivoa penetracije određenog proizvoda na tržištu u funkciji vremena. Ovaj logistički model razvio je *Verhulst* [119], koji je uveo mogućnost ograničenja populacije proizvoda na tržištu, preko formule (5.3), gde  $r_0$  predstavlja maksimalnu stopu rasta populacije proizvoda na tržištu. Stopa rasta opada sa brojem proizvoda  $Q$  i dostiže vrednost nula, u slučaju kada je  $Q = Q_u$ . Parametar  $Q_u$  je gornja granica rasta populacije proizvoda i naziva se *noseći kapacitet*. Ako broj proizvoda premaši vrednost  $Q_u$ , tada stopa rasta populacije proizvoda postaje negativna i broj proizvoda počinje da opada. Dinamika veličine populacije proizvoda je predstavljena diferencijalnom jednačinom (5.4), kao i rešenjem predstavljenim izrazom (5.5) [6].

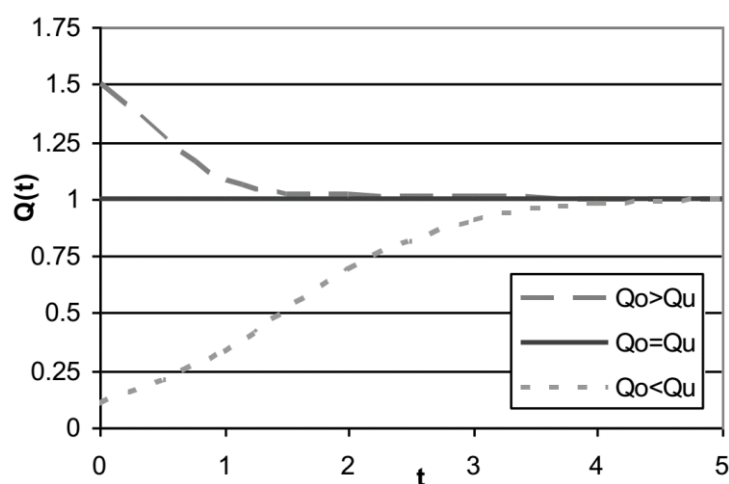
$$r = r_0 \cdot \left(1 - \frac{Q}{Q_u}\right) \quad (5.3)$$

$$\frac{dQ}{dt} = rQ = r_0 Q \cdot \left(1 - \frac{Q}{Q_u}\right) \quad (5.4)$$

$$Q(t) = \frac{Q_0 \cdot Q_u}{Q_0 + (Q_u - Q_0) \cdot \exp(-r_0 t)} \quad (5.5)$$

Logistički model ima tri moguća ishoda, kao što je ilustrovano na Slici 54 [6]:

- Ako  $Q_0 < Q_u$ , populacija se povećava i dostiže zasićenje. Ovo je oblik logističke S-krive.
- Ako je  $Q_0 > Q_u$ , populacija se smanjuje i dostiže konstantni minimum.
- Ako je  $Q_0 = Q_u$ , populacija se ne menja.



Slika 54. Kriva logističkog rasta [6]

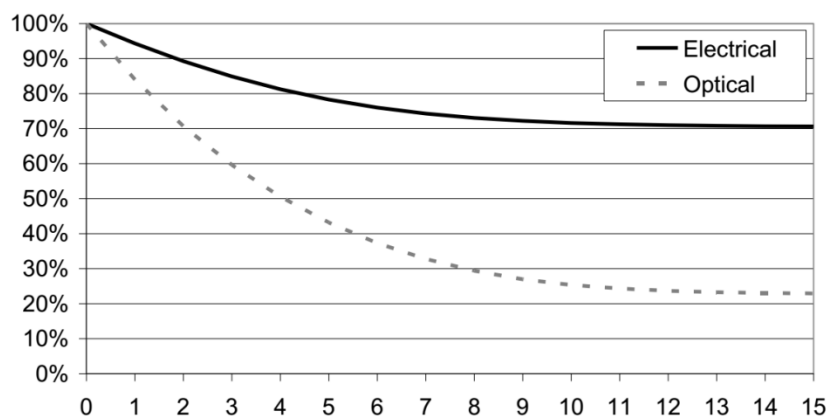
U Projektu RACE TITAN [33] predloženo je nekoliko evolutivnih trendova za procenu troškova proizvodnje mrežnih komponenti u odnosu na njihovu tehnološku zrelost, odnosno pripadnost određenoj generaciji tehnologija. Ovi trendovi su zasnovani na kombinaciji modela krive iskustva i modela logističkog rasta. Shodno navedenom, troškovi se mogu predstaviti preko jednačine trenda (5.6) [6]:

$$C(t) = C_0 \left[ \frac{1}{Q_0} \left( 1 + e^{\left[ \ln \left( \frac{1}{Q_0} - 1 \right) - 2t \frac{\ln(9)}{\Delta t} \right]} \right)^{-1} \right]^{\log_2 K}, \quad (5.6)$$

gde su:

- $t$  označava godinu prognoziranog troška u odnosu na godinu početka proizvodnje (referentna godina,  $t=0$ );
- $C_0$  označava trenutni trošak posmatrane komponente na početku (referentna godina,  $t = 0$ ).
- $Q_0$  označava procenat penetracije u referentnom godini. To je indikator nivoa zrelosti komponente dostignut u  $t = 0$ . Niska vrednost  $Q_0$  predstavlja one komponente koje imaju relativno kratak industrijski životni ciklus.
- $K$  označava faktor smanjenja troškova, predstavljen stopom krive iskustva (5.1) ili krivom logističkog rasta (5.5).
- $\Delta t$  označava vreme koje je potrebno da logistička kriva  $Q(t)$ , dostigne raspon nivoa od 10% do 90% vrednosti maksimalnog procenta penetracije; ovaj vremenski interval predstavlja period visokog stepena komercijalizacije; niska vrednost  $\Delta t$  ukazuje na pripadnost tehnologiji koja će ranije biti zamenjena ili slučaj u kome će posmatrano tržište biti ubrzo zasićeno sa posmatranim proizvodom [6].

Prednost navedenog modela zasniva se na mogućnosti efikasne implementacije u domenu telekomunikacija, jer se može primeniti u slučajevima kada postoji veoma mali statistički uzorak, ili gde se ne može doći do relevantnih podataka o posmatranim troškovima odnosno cenama opreme. Tipične vrednosti za  $Q_0$ ,  $\Delta t$  i  $K$  se nalaze u [33]; za električnu mrežnu opremu (0,1; 10; 0,9), kao i optičku mrežnu opremu (0,01; 8; 0,8). Za oba skupa parametara, proširena kriva iskustva prikazana je na slici 55. Vrednosti  $Q_0$  date su u Prilogu 2, u tabelama 1 i 2.



Slika 55. Kriva logističkog rasta - pad cena tokom vremena u slučaju elektronske i mrežne optičke opreme [6]

Kriva logističkog rasta je primenjena prilikom rešavanja problema proširenja WDM linka, prikazanog u sedmom poglavlju. U navedenom slučaju, primenjena je formula (5.6) za izračunavanje godišnjeg pada pretpostavljene cene fiksnog *grid* multipleksera po jednoj talasnoj dužini, kao i pretpostavljene cene opreme na nivou čvora za tehnologiju fleksibilnog *grida*, u slučaju realizaciji odluke o migraciji tehnologija<sup>16</sup>, koji je prikazan u Prilogu 2, Tabela 3. Pošto se formulom (5.6) vrši proračun pada cena na godišnjem nivou, za dobijanje vrednosti cena na mesečnom nivou upotrebljena je linearna interpolacija. Mesečne vrednosti dobijenih cena, prikazane su u Prilogu 2, Tabela 4. Treba napomenuti da je za cenu fiksnog *grid* multipleksera po jednoj talasnoj dužini, izvršen proračun od početka 2011. godine [120], gde je usvojena klasa penetracije proizvoda „Old-medium“ (Prilog 2, Tabela 2) za parametre  $Q_0$  i  $\Delta t$ . S druge strane, usvojeno da se cena opreme na nivou čvora za tehnologiju fleksibilnog *grida*, izračunava od početka 2014. godine [120], gde je usvojena klasa penetracije proizvoda „New-medium“ (Prilog 2, Tabela 2).

### 5.3 Evaluacija tehno-ekonomskog modela

Nakon formiranja tehno-ekonomskog modela, kojim se određuju prihodna i troškovna strana planirane mreže, kao i tok novca u svakom delu identifikovanih procesa, potrebno je na osnovu datih informacija, doneti odluku o realizaciji

<sup>16</sup> Videti poglavlje 7



predloženog poslovnog modela. Proces donošenja odluke obično uključuje komparativnu analizu različitih predloga projekata (ili njihovih delova), primenom odgovarajućih tehnika koje se koriste u tradicionalnoj investicionoj analizi [121]. Osim ocene jednog planskog projekta, posmatrano sa aspekta njegove profitabilnosti, poželjno je ispitati i položaj operatora u poslovnom okruženju koji se odnosi na mogućnosti i rizike, konkurenciju, saradnju, itd. [6].

### 5.3.1 Analiza investicije

Analiza novčanih tokova daje dobru procenu o profitabilnosti projekta i godišnjim investicionim troškovima i/ili nivoima profita. Treba napomenuti da postoji razlika između novčanih tokova sa jedne strane, i troškova i prihoda sa druge [122]. Novčani tokovi ukazuju na troškove i prihode koji se stvarno mogu realizovati. Ovo se može videti u Tabeli 11, u kojoj se porede načini proračuna profita sa jedne strane, i proračuna novčanog toka sa druge strane [6].

Tabela 11. Uporedni prikaz proračuna profita i proračuna novčanog protoka [6]

<b>PRORAČUN PROFITA</b>	<b>PRORAČUN PROTOKA NOVCA</b>
PROMET	PROMET
- Troškovi prodaje proizvoda	- Troškovi prodaje proizvoda
<b>UKUPAN PROFIT</b>	- Troškovi operativnog rada
- Ukupni troškovi operativnog rada	- Kapitalni troškovi
<b>EBITDA</b>	- Porez
- troškovi amortizacije	- Neto obrtni kapital
<b>EBIT</b>	<b>NETO PRILIV GOTOVINE</b>
- Finansijski rezultat	
<b>ZARADA PRE PLAĆANJA POREZA</b>	
- Porez	
<b>ZARADA POSLE PLAĆANJA POREZA</b>	

Može se uočiti da analiza novčanih tokova daje podatak o vremenu u kome profit postaje bitan za posmatranog operatora, dok sumiranje svih novčanih tokova daje podatak o ukupnoj profitabilnosti projekta. Ulaganje novca u projekat treba da proizvede dobitak na kraju posmatranog projekta. U telekomunikacijama, ovaj dobitak se kreće u granicama od 8.1% do 10.6% [123] ili do 11.2%, u primeru belgijskog operatora Belgacom [124]. Očekivani dobitak projekta se koristi kao diskontni faktor (diskontna stopa novčanog toka) prilikom razmatranja budućih novčanih tokova, jer „novac koji je

danas potrošen vredan je manje, nego u slučaju da je potrošen sutra“, [6]. Shodno navedenom, diskontna stopa novčanog toka (*Discounted Cash Flow*, DCF), može se predstaviti izrazom:

$$DCF = \frac{CF_t}{(1+r)^t}, \quad (5.6)$$

gde su:  $t$  – referentna jedinica vremena (na primer, godina),  $CF_t$  novčani tok u periodu  $t$ , a  $r$  diskontna stopa.

Povratna stopa investicije (ROI) se obračunava iz novčanih tokova, kao količnik novčanog toka i vrednosti investicija u trenutku  $t$ . U slučaju da se ovo koristi u procesu odlučivanja, projekat se može izvršiti samo pod uslovom da obrt investicije projekta premašuje određeni predefinisani minimalni obrt investicije [6]. Povratna stopa investicije je predstavljena sledećim izrazom (5.7):

$$ROI = \sum_{t=0}^N \frac{CF_t}{ICF_t}, \quad (5.7)$$

gde je  $ICF_t$  vrednost investicija u trenutku  $t$ .

Jednostavno izračunavanje ROI-a (5.7) se obično koristi za kratkoročne investicije i koristi npr. manje od godinu dana. Međutim, ovaj metod je manje tačan kada se investicije i novčani tokovi posmatraju tokom više godina. Tom prilikom treba koristiti metodu diskontovanog ROI (*Discounted ROI*), koja je predstavljena izrazom (5.8) [6]:

$$Discounted ROI = \sum_{t=0}^N \frac{CF_t / (1+r)^t}{ICF_t}, \quad (5.8)$$

Kumulativni novčani tokovi, predstavljaju stvarni odnos prihoda i investicija. Vreme obrta (*Payback Time*, PB) i može se koristiti kao ograničavajući faktor za projekat. Vreme obrta je prikazano izrazom (5.9) [6]:

$$PB = n: \sum_{t=0}^{n-1} CF_t < 0, \sum_{t=0}^n CF_t \geq 0, \quad (5.9)$$

Projekat se može izvršiti samo pod uslovom da je vreme obrta kratko ili jednako nekom od prethodno definisanih prihvatljivih perioda. Takođe, može se odrediti

diskontovano vreme obrta (Discounted Payback Time, DPB), prikazano izrazom (5.10) [6]:

$$DPB = n : \sum_{t=0}^{n-1} \frac{CF_t}{(1+r)^t} < 0, \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} \geq 0, \quad (5.10)$$

Diskontovani kumulativni novčani tokovi najčešće se nazivaju neto sadašnja vrednost (*Net Present Value*, NPV) i definišu se sledećim izrazom [6]:

$$NPV = \sum_{t=0}^N \frac{CF_t}{(1+r)^t}, \quad (5.11)$$

gde su:  $t$  – vreme novčanog toka,  $CF_t$  – novčani tok u vremenu  $t$ ,  $N$  – ukupno vreme trajanja projekta i  $r$  – diskontna stopa.

U nekim slučajevima pretpostavlja se da će se trendovi troškova i prihod nastaviti u godinama nakon razmatranog vremenskog okvira. Ovaj novčani tok se diskontuje unazad (u poslednju godinu), i u tom slučaju se zove *Terminalna vrednost* [6]. S obzirom na to da NPV zavisi od dužine vremenskog okvira, ovo može biti korisno za lakše poređenje različitih projekata sa različitim vremenskim okvirima. U opštem slučaju, NPV se smatra najpouzdanijim statičkim kriterijumom poređenja i selekcije [6]. Projekat se može odabrati samo pod uslovom da ima pozitivnu NPV vrednost. NPV se takođe može koristiti u upoređivanju dva projekta, u kojima će projekat sa najvećom NPV biti izabran u odnosu na drugi projekat. Samo u slučaju da dva projekta imaju istu NPV, odluka može biti zasnovana na drugim tehnikama [6].

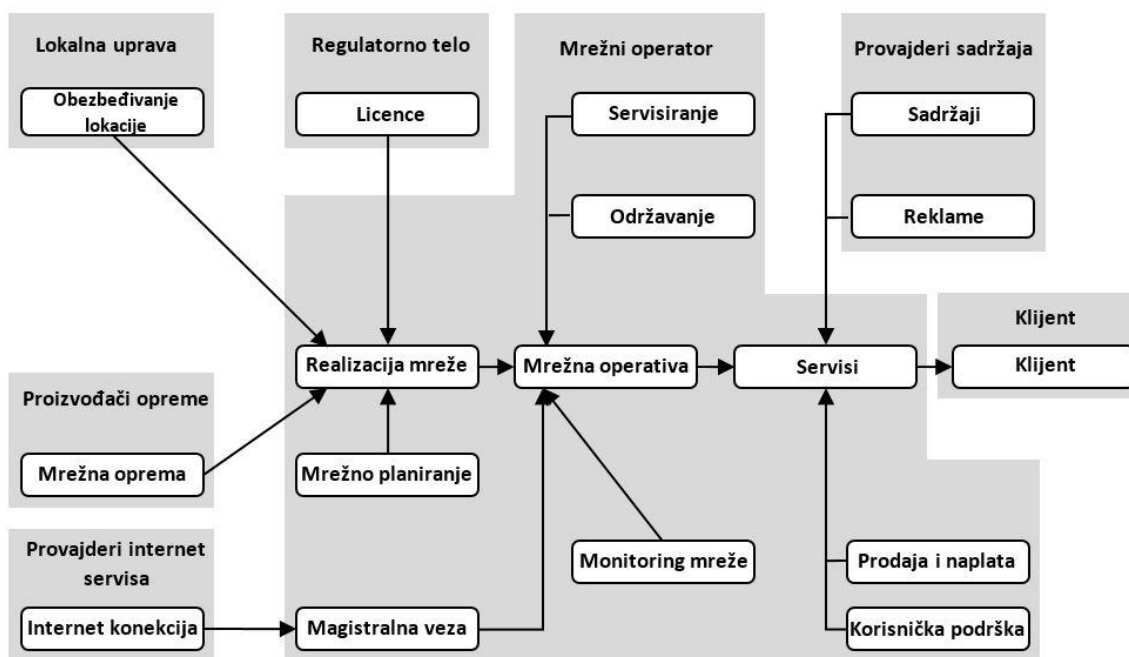
Pored navedenih, u analizama evaluacije figuriše i interna povratna stopa (*Internal Rate of Return*, IRR), koja se definiše kao diskontna stopa, po kojoj je NPV vrednost jednaka nuli. Svaki projekat sa internom povratnom stopom, koji ima veću vrednost od troškova kapitala, takođe će imati pozitivnu NPV vrednost. Međutim, IRR ima neke značajne nedostatke, istaknute u [125]. Pretpostavlja se da privremeni pozitivni novčani tokovi reinvestiraju po istoj povratnoj stopi projekta koji ih generiše [6]. Međutim, mnogo je veća verovatnoća, da će se sredstva reinvestirati po stopi blizu troškova kapitala. Kada je veća od troškova kapitala, IRR daje preterano optimističnu procentnu vrednost. Pored navedenog, u nekim projektima kod kojih je identifikovan nepravilan novčani tok koji oscilira između pozitivnih i negativnih vrednosti, može se

pojavit će veći broj vrednosti interne povratne stope, što može proizvesti efekat konfuzije i voditi ka donošenju pogrešne investicione odluke. U tom slučaju, primenjuju se vrednosti proširene (*Extended Internal Rate Of Return*, MIRR) i modifikovane interne povratne stope (*Modified Internal Rate Of Return*, MIRR) [126], [6].

### 5.3.2 Analiza mreže vrednosti

Analiza investicija obično uzima u obzir profitabilnost jednog projekta. Međutim, analiza mreže vrednosti razmatra širi kontekst, uključujući sve aktere koji mogu uticati na projekat [6].

Opisivanje mreže vrednosti (Slika 56), počinje se listingom svih uloga. Uloge pokazuju šta treba uraditi i označene su zaokruženim poljima na slici. Akteri, sa druge strane, ukazuju na to ko vrši zadatak i označava sivim grupacijama na slici. Mreža vrednosti pokazuje koji akteri uzimaju koje uloge i kakav je njihov odnos. Primera radi, licenciranje za određeni tip servisa je tipična uloga regulatornog tela (regulatora). Mrežni operatori mogu preuzeti više uloga od uvođenja mreže do pružanja usluga [6].



Slika 56. Poslovne uloge i akteri u mreži vrednosti [6]

Identifikovani akteri se, prema Porteru [127], lako mogu klasifikovati na: konkurenciju, dobavljače, kupce, substitute i potencijalne učesnike [6].

SWOT analiza (snaga, slabost, mogućnosti i pretnje) može pomoći da se utvrdi uticaj određenog projekta na različite aktere. Međutim, takođe je važno fokusirati se i na interakcije između različitih aktera. Zbog toga se identifikuju i izračunavaju novčani tokovi između različitih aktera. Odnosi definisani u mrežama vrednosti i poslovnim modelima određuju rizik za svakog aktera, što će se odraziti na novčane tokove između različitih aktera. Na slici 57, prikazan je primer u kome se analizuju različiti akteri, kao i poslovni model, u smislu veličine investicija i prihoda i ukupnog rizika [6].



Slika 57. Primer analize mreže vrednosti – analiza međusobnih uticaja različitih aktera [6]

SWOT analiza takođe može biti korisna u odlukama o plasiranju proizvoda, *outsourcing*-u naspram vlastitog razvoja, strateškog usmeravanja proizvoda i operativnom planiranju [6].

## 5.4 Korekcija tehno-ekonomskog modela

Korekcija tehno-ekonomskog modela predstavlja poslednji korak Demingovog ciklusa i odnosi se na primenu analiza osetljivosti odabranih modela, odnosno analizu ponašanja modela u odnosu na promene pripadajućih parametara. Na osnovu izvršenih analiza vrši se korekcija samih modela, sa ciljem uvećanja nivoa njihove fleksibilnosti, u odnosu na parametarski definisane promene. Šta bi se desilo ako bi cene opreme brže ili sporije padale nego što se očekivalo? Šta ako dobijemo manje, ili u drugom slučaju, više kupaca? Koje su granice u kojima i dalje možemo biti sigurni i koje su ukupne šanse za pozitivan poslovni slučaj? Upravo analiza osetljivosti formiranog modela daje odgovore na ova pitanja [6].

### 5.4.1 Analiza osetljivosti

Analiza osetljivosti se koristi kada se želi steći širi pogled na rizike projekta. Posebno u slučaju da postoji doza nesigurnosti u vezi sa nekim ulaznim parametrima. U

pogledu pristupa, razlikujemo osnovnu analizu osetljivosti i analizu globalne osetljivosti. U osnovnoj analizi osetljivosti istražuje se uticaj promene jednog ulaznog parametra (zadržavajući ostale parametre fiksne) [6]. Rezultujuća osetljivost je varijansa ishoda za datu varijaciju ulaznog parametra. Kada se izvrši za sve ulazne parametre, normalna varijansa se može izračunati za svaki parametar deljenjem pojedinačne varijanse sa ukupnom varijansom. Mera za ovaj uticaj je normalizovani uticaj svakog parametra na ukupnu varijansu. Prema [128], ovaj pristup nije preporučljiv za detaljnu analizu, već za smanjenje broja ulaznih parametara koji se uzimaju u obzir u globalnoj analizi osetljivosti [6].

#### 5.4.2 Vrednost realnih opcija

Metodologija vrednovanja prave opcije pokušava da uključi vrednost menadžerske sposobnosti koja je prisutna u poslovnom odlučivanju, na isti način na koji se procenjuje fleksibilnost prikazana u finansijskim opcijama (preko akcija). *Finansijska opcija* daje pravo na kupovinu ili prodaju, u utvrđenom vremenskom periodu, osnovnu vrednost akcija po unapred određenoj ceni (za potrebe vežbanja). *Realne opcije* su definisane 1977. godine [127] i primenjuju teoriju određivanja opcija na vrednovanje investicija u realnim sredstvima. To se posebno pokazalo korisnim za investicione odluke koje se sastoje od različitih (opcionih) faza. To su, na primer, kupovina licenci od regulatornog tela za pokrivanje svih mogućih scenarija razvoja telekomunikacionih servisa, formiranje rasporeda instaliranja opreme, prema scenariju koji bi mogao biti realizovan, itd [6].

Pristup koji se primenjuje na tehničke projekte podrazumeva sledeća tri koraka [6]:

1. identifikovati ključne neizvesnosti,
2. identifikovati opcije,
3. vrednovati opcije, uzimajući u obzir neizvesnost.

Identifikacija ključnih neizvesnosti, koje mogu uticati na realizaciju jednog projekta u realnoj situaciji, odnosi se na kvantifikaciju verovatnoća pojedinih opcija, za koje se procenjuje neizvestan ishod realizacije. Kvantifikacija se odnosi na formiranje funkcija gustine verovatnoća posmatranih vrednosti neizvesnosti. Navedene funkcije se, nadalje,

moгу koristiti u proceni realne opcije. Za otkrivanje različitih opcija, za koje je u projektu procenjeno da se mogu pojaviti u stvarnosti, predlaže se primena tzv. *okvira 7S* [129].

#### 5.4.2.1 Vrste realnih opcija

Različiti tipovi realnih opcija mogu se klasifikovati prema tzv. *7S-okviru*: opcije investiranja/rasta (*Scale up*, *Switch up*, *Scope up*), opcije odlaganja/učenja (*Study*) i opcije za dezinvestiranje/smanjenje (skaliranje, isključivanje, smanjenje obima) (Tabela 12) [6].

Tabela 12. Vrste opcija [6]

Kategorija	Tip	Opis	Primer
investiranje/rast	<i>Scale up</i> – pojačati	Sekvencijalno ulaganje u kasnijoj fazi prateći rast tržišta	Brže plasiranje novih proizvoda ako je stopa preuzimanja veća od očekivanog
	<i>Switch up</i> – uključiti	Uključiti proizvode, proces ili opremu prema promeni cene ili tražnje	Nadogradnja 3G-a na 4G opremu kada su povećani saobraćajni zahtevi
	<i>Scope up</i> - povećati opseg poslova	Ući u drugu industriju kada je to moguće.	Javna preduzeća koja ulažu u optičku mrežu
odlaganje/učenje	Proučavanje / početak	Odložiti investicije sve dok se ne dobiju dodatne informacije i/ili veštine	Gledajući najbolje prakse u susednim zemljama pre nego što se započne implementacija FTTH
dezinvestiranje/skupljanje	<i>Scale down</i> umanjiti	Smanjiti ili zatvoriti projekat ako nove informacije menjaju očekivane prihode	Nekoliko pokrajinskih WiFi mreža u SAD je zatvoreno zbog razočaravajućeg prihvatanja od strane kupaca
	<i>Switch down</i> - isključi	Prebaciti se na ekonomičniju i fleksibilniju opremu po dobijanju novih informacija	Mrežne kartice mogu biti zamenjene novom generacijom koja vodi ka efikasnijoj potrošnji električne energije
	<i>Scope down</i> - smanji opseg poslova	Ograničiti obim poslovanja u povezanim industrijama kada nema više potencijala	Odustajanje od "bakarnih mreža" usled pojave velikog broja FTTH mreža

Za postavljanje nove telekomunikacione mreže koriste se realne opcije tipa uvećanja, s obzirom na to da će mreža biti proširena zavisno od budućih događaja na

tržištu. Ova opcija je vredna, jer operatoru trenutno nije potrebno da preuzme buduće investicije, čime se ograničava rizik od negativnih posledica [6].

#### 5.4.2.2 Vrednost opcija kao proširenje NPV

Teorija realnih mogućnosti omogućava dodavanje vrednosti onim opcijama, koje postaju očigledne tokom životnog veka investicionog projekta (kao što je proširenje, smanjenje ili zaustavljanje projekta). Ovo se može smatrati tzv. proširenjem pravila NPV. NPV diskontuje novčane tokove koristeći fiksnu diskontnu stopu i procenjuje donošenje odluke o investiciji tipa „sad-ili-nikad“. Za rizične projekte, vrlo je teško odrediti odgovarajuću diskontnu stopu. Teorija realnih opcija, s druge strane, uključuje opcije koje mogu biti prisutne u investicionom projektu sa neizvesnim parametrima. Zbog toga, ova teorija uključuje fleksibilnost u procesu odlučivanja i izbegava potrebu određivanja prilagođene diskontne stope za procenu opcija. Vrednost projekta se, prema tome, može proširiti vrednošću opcija, u skladu sa sledećim izrazom [6]:

*Prošireni (strateški) NPV = pasivni NPV očekivanih novčanih tokova + vrednost opcija*

Procena stvarnih opcija je naročito korisna za dvofazne investicione odluke, sa opcionom drugom fazom (npr. realizovana je, samo u slučaju, ako je tržišna situacija povoljna). Ovo objašnjava pogodnost stvarnih opcija za nesigurne investicione poduhvate. Do trenutka druge faze investiranja situacija na tržištu je jasnija, tako da se može preduzeti dobro savetovano rešenje [6].



## 6 METODE OPTIMIZACIJE U PROCESU PLANIRANJA MREŽE

### 6.1 Uvod

Planiranje jedne mreže može se predstaviti kao proces koji uključuje sve aktivnosti vezane za razvoj jedne mreže, neophodne da bi se obezbedili resursi dovoljni za realizaciju očekivanih saobraćajnih zahteva, u skladu sa datim tehničkim i ekonomskim ograničenjima. Prisustvo ograničenja, u opštem smislu, zahteva rešavanje odgovarajućih planskih problema primenom različitih metoda optimizacije. Shodno navedenom, primena različitih optimizacionih metoda iz oblasti operacionih istraživanja, predstavlja sastavni deo metodologije planiranja telekomunikacionih mreža. Generalno posmatrajući, uloga operacionih istraživanja u procesu planiranja uključuje primenu tehnika, kao što su:

- matematičko programiranje – primena tehnika linearnog, celobrojnog, binarnog, odnosno mešovito celobrojnog programiranja i sl.;
- heuristički algoritmi – primena posebno (za posmatrani problem) dizajniranih algoritama, kao alternative klasičnim metodama optimizacije, sa ciljem skraćanja vremena, neophodnog za pronalaženje rešenja koja su često približno jednaka optimalnom rešenju.
- metaheuristički algoritmi - modeli koji pripadaju klasi stohastičkih populacionih metaheuristika i podrazumevaju generisanje određenog broja (skupa) slučajnih rešenja, koja pripadaju tzv. prostoru rešenja (*solution space*). Primenom algoritma zasnovanog na setu operacija kojima se oponašaju određeni prirodni procesi, ili sistemi, vrši se pretraga i evaluacija datih rešenja. Na osnovu dobijenih rezultata sintetizuje se skup nove generacije rešenja (sa poboljšanim karakteristikama), koji se nadalje iterativnim metodama ponovo uvodi u proces radi dalje selekcije i evaluacije. Nakon određenog broja iteracija, evolutivni proces dovodi do

generisanja rešenja koje je identično ili približno jednako optimalnom rešenju [91].

Priroda planskih aktivnosti, posmatrano sa aspekta vremenskog domena, determiniše dve osnovne klase problema, u kojima je zastupljena primena metoda optimizacije:

- LTP aktivnosti pružaju fokus na različite grupe zadataka, što zavisi od toga da li se u planovima razmatra izgradnja potpuno nove mreže ili se postojeća mreža nadgrađuje odnosno proširuje. U prvom slučaju, planske aktivnosti odgovaraju green-field pristupu, koji uključuje definisanje topologije mreže, odabir odgovarajuće tehnologije i dimenzionisanje kapaciteta pripadajućih čvorova i linkova sa stanovišta dugoročnog radnog veka, kao i neophodnih investicija za implementaciju. U slučaju nadgradnje postojeće mreže (brown-field planski pristup<sup>17</sup>), LTP aktivnosti podrazumevaju proširenje ili restrukturiranje postojeće topologije, (strukturni inženjering), uvođenje novih ili unapređenje postojećih tehnologija, praćeno odgovarajućim dimenzionisanjem kapaciteta restrukturirane mreže, generalno klasifikovano kao „planiranje kapaciteta“.
- MTP aktivnosti, sa druge strane, teže realizaciji ciljeva zacrtanih dugoročnim planom, prema kojem je topologija mreže i tehnološka struktura već definisana. Imajući u vidu da, usled prisustva neizvesnosti, postoji mogućnost pojave zagušenja na pripadajućim linkovima, prisutne su dve grupe problema koje u ovom slučaju treba rešiti. Prva grupa se odnosi na probleme optimizacije saobraćajnih tokova (rutiranje saobraćaja, primenu QoS mehanizama i sl.), koji se klasifikuju kao saobraćajni inženjering. Druga grupa problema odnosi se na rešavanje problema zagušenja posmatrane mreže kroz donošenje odluka o proširenju kapaciteta, u toku određenog vremenskog perioda koje se uopšteno klasifikuju kao „strategije proširenja kapaciteta mrežnih resursa“.

Bez obzira na vremenski okvir i pristup, realizacija razmatranih rešenja po pravilu je limitirana određenim tehničkim i ekonomskim ograničenjima, zbog kojih je, po pravilu, neophodna primena metoda optimizacije.

---

<sup>17</sup> Osvrt na *green field* i *brown field* pristup je pružen u poglavlju 1.1

Primena optimizacionih metoda iz oblasti operacionih istraživanja značajno doprinosi povećanju efikasnosti „*Breakdown*“ pristupa u procesima planiranja na MTP i LTP nivou (poglavlje 2.2), imajući u vidu uštede u vremenu koje se mogu ostvariti prilikom rešavanja „manjih“ odnosno „jednostavnijih“ problema [26].

Pored navedenog, primena metoda optimizacije nije potpuno ograničena samo na navedene klase problema, već je prisutna i u ostalim segmentima planskih aktivnosti u kojima se može pojaviti potreba za iznalaženjem optimalnih vrednosti.

Imajući u vidu predmet istraživanja, u ovom poglavlju biće pružen osvrt na pregled strategija za proširenje kapaciteta mrežnih resursa, sa posebnim fokusom na unapređenje strategije za proširenje kapaciteta mrežnog linka, čiji je model predložen u ovoj disertaciji.

## 6.2 Problemi proširenja kapaciteta mrežnih resursa

Problemi proširenja kapaciteta mrežnih resursa predstavljaju grupu problema u kojima se kontrola zagušenja posmatranih resursa mreže, realizuje kroz povećanje odgovarajućih kapaciteta i gde se odluke o proširenju donose u skladu sa ograničenjima vezanim za korespondentnu fizičku topologiju mreže, primenjene tehnologije i dostupni budžet. Odluke o proširenju kapaciteta direktno ili indirektno ukazuju na vreme kada se proširenje kapaciteta treba realizovati. Indirektan način ne podrazumeva upotrebu eksplicitnog vremenskog momenta, već ukazuje na druge faktore koji impliciraju na ispunjenost uslova za sprovođenje odgovarajućeg proširenja kapaciteta u određenom vremenu. Taktičke odluke o proširenju kapaciteta, u toku određenog vremenskog perioda, koje se uopšteno klasifikuju kao „strategije proširenja kapaciteta mrežnih resursa“, mogu se donositi jednokratno ili serijski, u zavisnosti da li obuhvataju jedan ili više vremenskih slotova (respektivno). Jednokratno rešavanje problema kapaciteta (*single-period capacity expansion planning*) primenjuje se u situacijama kada je potrebno doneti odluku o proširenju samo za jedan, naredni vremenski slot. Nasuprot tome, grupa planskih problema u kome se proširenje kapaciteta posmatranih resursa razmatra za više vremenskih slotova (*multi-period capacity expansion planning*), zahteva donošenje serije odluka o proširenju, gde je svaka pojedinačna odluka po pravilu vezana za jedan vremenski slot. Pod resursima mreže se, u ovim slučajevima,

podrazumevaju mrežni linkovi i/ili odgovarajuća mrežna oprema u čvorovima, na koju su posmatrani linkovi povezani.

## 6.2.1 Strategije jednokratnog proširenja mrežnih resursa

### 6.2.1.1 Problem proširenja kapaciteta linkova mreže sa ograničenjem budžeta

Klasičan problem proširenja kapaciteta linkova mreže [80], [130], odnosi se na pronalaženje optimalnih kapaciteta linkova, takvih da troškovi njihovog zagušenja ne budu veći od raspoloživog budžeta  $C$ . Problem se zasniva na pretpostavci da je trošak za proširenje kapaciteta jednog linka za 10 jedinica kapaciteta niži od troška proširenja 10 linkova za po jednu jedinicu kapaciteta. Shodno navedenom, troškovi zagušenja mogu se definisati na sledeći način: neka je posmatrana mreža predstavljena skupom  $G(N,L)$ , gde je  $N$  skup čvorova, a  $L$  skup linkova, i za koju su poznati podaci o ponuđenom saobraćaju i njegovom rutiranju. Tada je, za svaki link  $l \in L$ , poznat intenzitet saobraćaja, na osnovu čega se troškovi zagušenja mogu dobiti sledećim izrazom [80]:

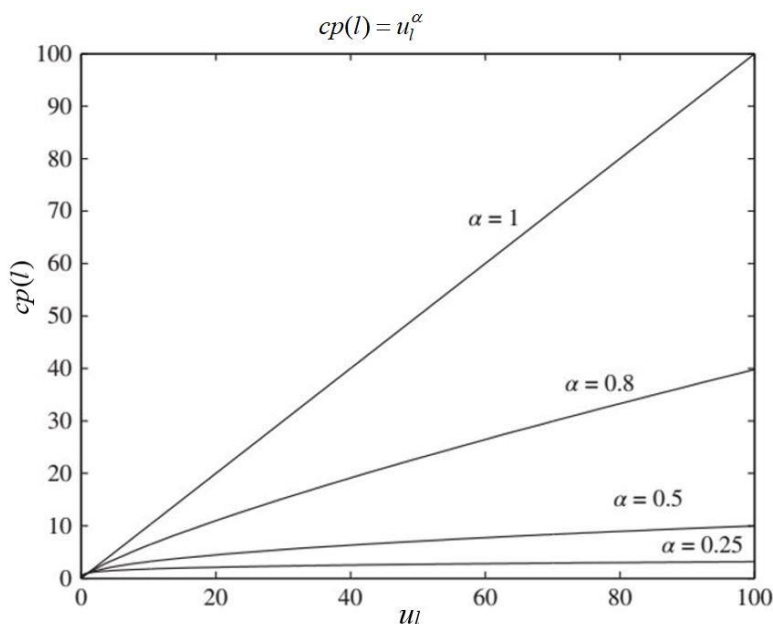
$$cp(l) = cp_l \cdot u_l^\alpha \quad (6.1)$$

gde su:  $cp_l$  - nivo troškova po jedinici kapaciteta linka  $l$ ,  $u_l$  – kapacitet linka  $l$ , dok  $\alpha$  predstavlja faktor sniženja troškova u odnosu na planirani kapacitet proširenja, sa vrednostima u rasponu  $\alpha \in (0,1]$ . Na taj način, odnos između proširenja kapaciteta  $k$  linkova za  $u$  jedinica kapaciteta po linku i proširenja kapaciteta jednog linka za  $ku$  jedinica kapaciteta može se predstaviti izrazom [80]:

$$\frac{kcp_l u^\alpha}{cp_l (ku)^\alpha} = \frac{k}{k^\alpha} = k^{1-\alpha} \quad (6.2)$$

Slika 58 pokazuje uticaj faktora  $\alpha$  na mogućnost ostvarenja ušteda, u slučaju upotrebe formule (6.2) u gore navedenoj situaciji, na primeru, gde se analizira odnos troškova proširenja 10 linkova za po jednu jedinicu kapaciteta (prvi scenario,  $k=10$ ,  $u=1$ ), u poređenju sa proširenjem jednog linka za 10 jedinica kapaciteta (drugi scenario  $k=1$ ,  $ku=10$ ). Može se videti da pri vrednosti  $\alpha=1$ , troškovi rastu linearno sa kapacitetom tako da ne postoji mogućnost ostvarenja ušteda. Sa druge strane, pri vrednosti  $\alpha=0,5$ , vidi se da je trošak u slučaju prvog scenarija tri puta veći od troška nastalog pri drugom

scenariju ( $10^{0.5} \approx 3,1$ ). Uštede su još izraženije u slučaju  $\alpha=0,1$  gde je odnos troškova ova dva scenarija  $10^{0.9} \approx 7,9$ .



Slika 58. Vrednosti troškova zagušenja  $cp(l)$ , u odnosu na kapacitet linka  $u_l$ , za različite vrednosti parametra  $\alpha$  [80]

Na ovaj način parametri  $cp_l$  i  $\alpha$ , reflektuju strukturu troškova [80], zbog čega takođe figurišu i u matematičkoj formulaciji problema optimizacije. Neka je  $\rho$  kritično iskorićenje (zagušenje) resursa, u najgorem mogućem scenariju (u kome dolazi do degradacije kvaliteta servisa, bez obzira na primenjene mere) i neka je:

$u_l$  – kapacitet linka  $l$ ,  $\forall l \in L$ ,

$y_l$  – intenzitet ponuđenog saobraćaja na linku  $l$ ,  $\forall l \in L$ ,

$\rho_l$  – iskorišćenje linka  $l$ :  $\rho_l = y_l / u_l$ ,  $\forall l \in L$ ,

$\alpha$  – faktor sniženja troškova u odnosu na planirani kapacitet proširenja,  $\alpha \in (0,1]$ ,

$C$  – raspoloživi budžet.

Tada se funkcija cilja može predstaviti kao [80]:

$$\min_{\rho, \rho_l} \rho \quad (6.3)$$

pri sledećim ograničenjima:

$$\rho \geq 0 \quad (6.4)$$

$$\rho \leq 1 \quad (6.5)$$

$$\rho_l \leq \rho, \forall l \in L \quad (6.6)$$

$$\sum_l c_l y_l^\alpha \rho_l^{-\alpha} \leq C \quad (6.7)$$

Navedenom funkcijom cilja (6.3), minimizira se zagušenje posmatranog linka, dok se ograničenjima (6.4) i (6.5) definiše da zagušenje linka (u opštem slučaju) ne može biti manje od 0, niti veće od 1 (100%). Ograničenjem (6.6) definiše se da iskorišćenje linka  $\rho_l$  ne sme biti veće od kritične vrednosti  $\rho$ , dok se ograničenjem (6.7) obezbeđuje da troškovi proširenja ne mogu biti veći od raspoloživog budžeta  $C$  [80].

### 6.2.1.2 Problem proširenja modularnih kapaciteta mrežnih linkova

U praksi se problem proširenja kapaciteta posmatranih mrežnih linkova razmatra sa stanovišta primene odgovarajuće tehnologije, definisane planskim ciljevima na LTP nivou. Pošto mrežne tehnologije imaju striktno utvrđene transportne karakteristike, neophodne za pouzdan i efikasan prenos podataka, proširenje kapaciteta mrežnih linkova može se realizovati uzimajući u obzir diskretne vrednosti, karakteristične za posmatranu tehnologiju. U Tabeli 13 prikazani su primeri vrednosti kapaciteta za nekoliko mrežnih tehnologija, uzimajući u obzir prva dva sloja OSI referentnog modela.

Tabela 13. Kapaciteti linkova po različitim tehnologijama [80]

Tehnologija	Kapaciteti
OTN	(Gb/s) 1.25, 2.5, 10, 40, 100
SONET/SDH	(Gb/s) 0.051, 0.155, 0.622, 1.25, 2.5, 10, 40
Ethernet	(Gb/s) 0.01, 0.1, 1, 10, 100

Imajući u vidu primenu odgovarajućih tehnologija, problem proširenja kapaciteta mrežnih linkova može se predstaviti na sledeći način [80]. Neka je mreža predstavljena skupom  $G(N,L)$ , gde je  $N$  skup čvorova, a  $L$  skup linkova, i neka je sa  $K$  definisan skup primenjivih kapaciteta određen zadatom tehnologijom, gde se svaki

pojedinačni kapacitet realizuje kroz korespondentni tip mrežne opreme - modula  $k$ , ( $k \in K$ ).

Shodno navedenom, može se uvesti sledeća dodatna notacija:

$u(k)$  – kapacitet modula tipa  $k$ ,  $\forall k \in K$ ,

$cp(k)$  – trošak proširenja linka modulom tipa  $k$ ,  $\forall k \in K$ ,

$a_{lk}$  – broj modula tipa  $k$  neophodnih za realizaciju zahtevanog kapaciteta linka  $l$ ,  $\forall l \in L, \forall k \in K$ ,

Tada se na osnovu čega se navedeni problem može matematički formulisati kroz sledeću funkciju cilja:

$$\min_l \sum_l \sum_k a_{lk} cp(k) \quad (6.8)$$

pri sledećim ograničenjima:

$$y_l \leq \sum_k a_{lk} u(k), \quad \forall l \in L \quad (6.9)$$

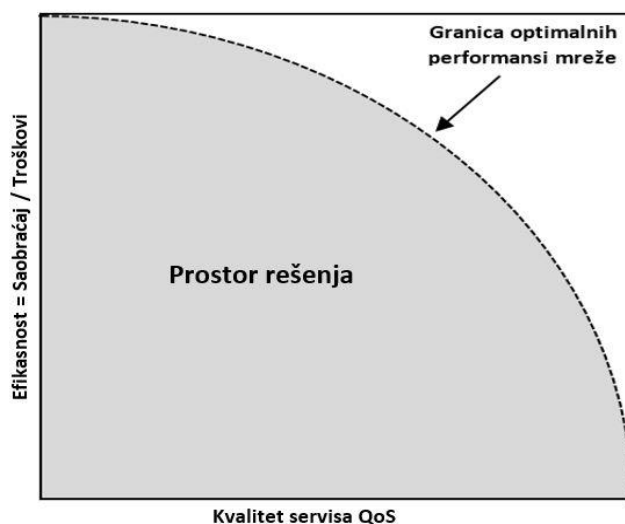
$$a_{lk} \geq 0, \quad \forall l \in L, \forall k \in K \quad (6.10)$$

Navedenom funkcijom cilja (6.8), minimizira se suma troškova proširenja kapaciteta posmatranog linka, dok se ograničenjem (6.9) obezbeđuje da kapaciteta linka  $l$ , izražen kroz sumu kapaciteta instaliranih modula, ne bude manji od intenziteta ponuđenog saobraćaja na tom linku. Konačno, ograničenjem (6.10) je obezbeđeno da broj modula tipa  $k$  neophodnih za realizaciju zahtevanog kapaciteta linka ima nenegativnu vrednost.

## 6.2.2 Strategije serijskog proširenja kapaciteta mrežnih resursa

Strategije serijskog proširenja kapaciteta mrežnih resursa predstavljaju grupu planskih problema u kojima se proširenje kapaciteta posmatranih resursa razmatra za više vremenskih perioda. Ova grupa problema ima poseban značaj, imajući u vidu činjenicu da pravilan izbor strategije za proširenje mrežnih resursa ima direktan uticaj na nivo troškova vezanih za proces proširenja kapaciteta, a tako i na nivo profita koji se može ostvariti u toku eksploatacije jedne mreže. Naime, tokom vremena dolazi do rasta

nivoa saobraćajnih zahteva, kao i do sve većeg iskorišćenja resursa posmatrane mreže [131]. Rast iskorišćenja iznad nekog kritičnog stepena utiče na pad performansi mreže, što u određenoj meri može biti korigovano upotrebom QoS mehanizama. Ipak, treba imati u vidu da intenzivna primena QoS obično vodi ka nižem stepenu efikasnosti funkcionisanja mreže, jer se time ili smanjuje obim saobraćaja (zarad održanja zahtevanog nivoa QoS) ili se troškovi opsluživanja saobraćaja (kroz QoS) drastično povećavaju (Slika 59), [98]. Pored toga, prekoračenje stepena iskorišćenja preko maksimalno prihvatljivog nivoa dovodi do nemogućnosti opsluživanja saobraćaja odnosno do pojave značajne degradacije performansi rada posmatrane mreže. Degradacija rada mreže, nadalje utiče na pojavu nezadovoljstva korisnika, kao i do potencijalnog pada profita mrežnog operatora. Shodno navedenom, interes mrežnih operatora je da mreža funkcioniše duž granice optimalnih performansi mreže (Slika 59), [98].



Slika 59. Optimalna granica performansi mrežnog resursa između koncepta efikasnosti funkcionisanja mreže i nivoa primene QoS [98]

Da bi se sprečio pad performansi mreže, operatori često pribegavaju preventivnoj nabavci i instalaciji nove mrežne opreme većeg kapaciteta (pravilo *Rule of Thumb*, [98]). Ovakva strategija tretira troškove opreme u trenutku donošenja odluke o proširenju kapaciteta. Pored navedenog, prerano instaliranje nove opreme prouzrokuje nizak i često nedovoljan stepen iskorišćenosti novih mrežnih resursa. Zbog toga se suma troškova nabavke kao i propušteni profit, mogu smatrati vrstom oportunitetnog troška nastalog u slučaju poređenja sa scenarijem nabavke i instalacije posmatrane opreme u



nekom kasnijem trenutku. Upravo, odluka da se nabavka (i instalacija) posmatrane opreme odloži za određeno vreme, odnosno do trenutka u kome mrežni resurs ostvaruje maksimalan prihvatljivi stepen iskorišćenosti, smatra se suštinom strategija koje predstavljaju alternativu prethodno navedenoj. Odluka o odlaganju je zasnovana na činjenici da cene mrežne opreme padaju tokom vremena, pa bi se odlaganjem kupovine mogla ostvariti odgovarajuća ušteda, uz istovremeno ostvarenje profita nastalog na bazi dodatnog produženja eksploatacije posmatrane mreže. Strategije vezane za odloženu nabavku i instalaciju mrežne opreme, predstavljaju vrstu optimizacionih problema čiji je cilj određivanje optimalnog vremenskog perioda do realizacije odluke o proširenju resursa mreže. U navedenim problemima figurišu prognozirane vrednosti odgovarajućih parametara, poput prognoziranih vrednosti saobraćajnih zahteva i prognoziranih vrednosti cena odgovarajuće opreme neophodne za proširenje odgovarajućih resursa. U zavisnosti od vremenskog perioda za koji se navedeni problemi razmatraju, prisutna je i neizvesnost koja se odnosi na rezultate prognožiranja intenziteta saobraćaja<sup>18</sup>.

#### 6.2.2.1 Strategija proširenja kapaciteta mrežnog linka bazirana na pragu iskorišćenja (T strategija)

Strategija proširenja kapaciteta mrežnog linka bazirana na pragu iskorišćenja (*Threshold-based Capacity Expansion Strategy, T strategija*) [98], predstavlja jedan od najjednostavnijih načina za rešavanje problema proširenja kapaciteta mrežnog linka upotrebom heurističkog pristupa. Za rešavanje problema proširenja kapaciteta posmatranog linka koriste se dve veličine: tzv. *vreme unapred* (*look-ahead time*,  $t_{la} = t_1 + \dots + t_n$ ,  $n > 0$ ), kao i tzv. *prag iskorišćenja* (*utilisation threshold*,  $Q_t^l$ ). Problem proširenja se, upotrebom ove heuristike, rešava na sledeći način: posmatra se nivo iskorišćenja linka ( $\rho_{t_0}$ ) u trenutnom vremenskom slotu  $t_0$ , kao i nivoi iskorišćenja  $\rho_t$  (sukcesivno, u narednim vremenskim slotovima  $t$ ), tako da njihovo zbirno vreme predstavlja vrednost  $t = t_0 + t_{la}$ . Ukoliko u vremenskom slotu  $t$ , vrednost prognožiranog intenziteta saobraćaja postane veća od vrednosti *praga iskorišćenja*  $\rho_t (y_t > Q_t^l)$ , onda

---

<sup>18</sup> detaljnije u poglavlju 2.1

upravo u tom slotu treba realizovati proširenje kapaciteta. Proširenje se može realizovati i u trenutku  $t_0$ , ukoliko se ustanovi da je navedeni uslov ( $y_{t_0} > Q_t^l$ ), već ispunjen. Ovaj slučaj je, u praksi, poznatiji kao tzv. *Rule of Thumb* pravilo.

### 6.2.2.2 Strategija serijskog proširenja modularnih kapaciteta mrežnih linkova

Ako se posmatra problem proširenja modularnih kapaciteta mrežnih resursa [80] za vremenski period sa  $\Delta T$  vremenskih slotova ( $t=t_0, \dots, t_0+\Delta T$ ). Neka kapaciteti posmatranih linkova imaju modularan karakter, gde je sa  $K$  definisan skup primenjivih kapaciteta, određen zadatom tehnologijom i gde se svaki pojedinačni kapacitet,  $u(k)$ , realizuje kroz korespondentni tip mrežne opreme - modula  $k$ , ( $k \in K$ ). Tada se može pretpostaviti da cena modula tipa  $k$ , u toku trajanja vremenskog slota  $t$  ima procenjenu vrednost  $cp(k,t)$ . Neka je  $h_{dt}$  prognozirana vrednost prosečnog intenziteta saobraćaja, generisanog zahtevom  $d$  ( $d \in D$ )<sup>19</sup> u vremenskom slotu  $t$ , pri čemu je  $h_{dt+1} > h_{dt}$ , imajući u vidu permanentni rast ponuđenog saobraćaja. Takođe, neka se posmatrani saobraćaj (generisan zahtevom  $d$ ) realizuje na putanjama  $p$  ( $p \in P_d$ ), kojima pripadaju i posmatrani linkovi  $l$ . Shodno navedenom, mogu se uvesti promenljive:

$a_{lkt}$  - broj NOVIH modula tipa  $k$ , za link  $l$ , nabavljen i instaliran,  
 $\forall l \in L, k \in K, t = t_0, \dots, t_0 + \Delta T$

$y_{pt}$  - deo intenziteta saobraćaja, koji je realizovan po putanji  $p$  u vremenskom slotu  $t$ ,  $\forall p \in P_d, t = t_0, \dots, t_0 + \Delta T$

Tada se funkcija cilja može predstaviti u sledećem obliku [80]:

$$\min_{a,y} \sum_t \sum_l \sum_k a_{lkt} cp(k,t) \quad (6.11)$$

pri sledećim ograničenjima:

$$\sum_{p \in P_d} y_{pt} = h_{dt}, \forall d \in D, t = t_0, \dots, t_0 + \Delta T \quad (6.12)$$

---

<sup>19</sup> pojam saobraćajnog zahteva je detaljnije objašnjen u poglavlju 4.1.2

$$\sum_{p \in P_d} y_{pt} \leq \sum_{t'=1}^t \sum_k a_{lkt'} u(k), \quad \forall l \in L, t = t_0, \dots, t_0 + \Delta T \quad (6.13)$$

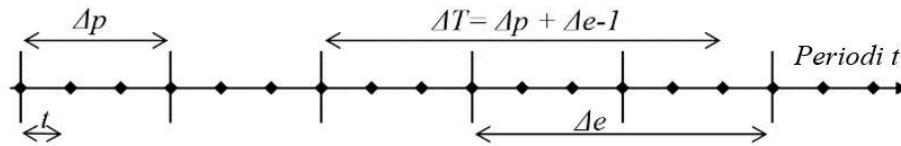
$$a_{lk} \geq 0, \quad \forall l \in L, \forall k \in K \quad (6.14)$$

$$y_{pt} \geq 0, \quad \forall p \in P, t = t_0, \dots, t_0 + \Delta T \quad (6.15)$$

Zadatak funkcije cilja (6.11) je da minimizira sume troškova proširenja u svim razmatranim vremenskim slotovima. Ograničenjem (6.12) se obezbeđuje da svi saobraćajni zahtevi budu opsluženi (duž posmatrane mreže). Ograničenje (6.13) obezbeđuje da intenzitet saobraćaja u svakom vremenskom slotu, na svakom linku ne bude veći od kapaciteta posmatranog linka, pri čemu treba imati u vidu da kapacitet linka predstavlja sumu kapaciteta instaliranih modula na datom linku.

### 6.2.2.3 Strategija serijskog proširenja kapaciteta mrežnih linkova sa funkcijom troškova zagušenja (CE strategija)

Strategija proširenja kapaciteta mrežnih linkova sa funkcijom troškova zagušenja bazirana je na procesu proširenja kapaciteta [98], koji je prikazan na Slici 60.



Slika 60. CE ilustracija vremenskih parametara kod CE strategije za proširenje kapaciteta za dati horizont planiranja [98]

Neka se posmatra mrežni link  $l$ , čije se proširenje kapaciteta razmatra na početku svakog vremenskog perioda  $\Delta p$ , pri čemu svaki vremenski period sadrži podjednak broj vremenskih slotova  $t$ . Za donošenje odluke o proširenju, analiziraju se prognozirane vrednosti intenziteta saobraćaja  $y_l$ , prognozirane vrednosti kapaciteta posmatranih linkova  $u_l$  (koje variraju tokom vremena, usled realizacije odgovarajućih proširenja), kao i cene opreme neophodne za realizaciju proširenja  $cp^{eq}$ . Imajući u vidu da je za realizaciju odluke o proširenju kapaciteta potrebno neko vreme (neophodno za nabavku opreme, instalaciju i aktiviranje), uvodi se vreme realizacije proširenja  $\Delta e$ , koje označava broj vremenskih perioda (od trenutka donošenja odluke o proširenju kapaciteta, pa do trenutka realizacije proširenja) i koje može biti veće ili manje od  $\Delta p$ .

Prognozirane vrednosti se analiziraju za period horizonta planiranja ( $\Delta T$ ), koji ne može biti manji od  $\Delta T_{min} = \Delta p + \Delta e - 1$ , [98]. U ovom problemu, pretpostavljena je politika proširenja kapaciteta, takva da se na posmatranom linku kapacitet dvostruko uvećava [98]. Takođe, pretpostavljeno je da na putanji između dva ista čvora postoji saobraćaj u oba smera, realizovan preko parova linkova ( $l_1, l_2$ ).

Troškovna struktura proširenja kapaciteta podrazumeva postojanje dve vrste troškova: troškovi proširenja kapaciteta (cene mrežne opreme,  $cp^{eq}$ ) i troškova nastalih usled zagušenja posmatranog linka ukoliko se njegov kapacitet proširi prekasno,  $cp^{cg}(\rho_l)$ . Pošto je troškove zagušenja teško direktno kvantifikovati na jednostavan način uvodi se parametar  $r$ , kojim se ponderiše odnos između ove dve vrste troškova, u obliku [98]:

$$r = \frac{cp^{eq}}{cp^{cg}(\rho_l)} \quad (6.16)$$

gde troškovi zagušenja linka zavise od nivoa iskorišćenja  $u_l$ . Troškovi zagušenja se dobijaju preko vrednosti funkcije troškova zagušenja linka<sup>20</sup>, pri čemu je funkcija troškova zagušenja formulisana kao niz od  $S$  linearnih segmenata. Shodno navedenom, može se uvesti sledeća notacija [98]:

a) *Oznake:*

$t = t_0, t_1, \dots, t_i, \dots, t_0 + \Delta T$	vremenski slot
$\Delta T$	horizont planiranja
$s = 1, \dots, S$	redni broj linearnog segmenta funkcije troškova zagušenja
$l = 1, \dots, L$	posmatrani link $l$

b) *Parametri modela:*

---

<sup>20</sup> videti poglavlje 4.1.4.8

$t_0$	početni vremenski slot u periodu $\Delta p$
$y_{tl}$	intenzitet saobraćaja na linku $l$ , u vremenskom slotu $t$
$u_{(t_0-1)l}$	inicijalni kapacitet linka $l$ , (pre primene modela ili vrednost u poslednjem vremenskom slotu $t_0 - 1$ , u prethodnom vremenskom periodu $\Delta p - 1$ )
$cp^{eq}$	troškovi opreme za proširenja kapaciteta
$cp_s^{cg}$	troškovi zagušenja na segmentu $s$ funkcije troškova zagušenja
$q_s$	donji nivo funkcije troškova zagušenja na segmentu $s$
$BM$	dovoljno veliki broj, $BM \geq \max_l (s^{\Delta T - 1} c)$
$\Omega$	par linkova $(l_1, l_2)$ , na putanji između dva čvora, sa suprotnim smerovima saobraćaja

c) *Promenljive*

$x_{stl}$	deo intenziteta saobraćaja linka $l$ , koji pripada linearnom segmentu $s$ funkcije troškova zagušenja
$u_{tl}$	kapacitet linka $l$ u vremenskom slotu $t$
$e_{tl}$	binarna promenljiva, sa vrednošću 1 ako je kapacitet linka proširen u vremenu $t$ , odnosno 0 u suprotnom slučaju.

Na osnovu prikazane notacije, predstavljeni problem može se matematički formulisati u formi mešovitog celobrojnog linearnog programiranja (*Mixed Integer Linear Programming problem* - MILP), sa sledećom funkcijom cilja [98]:

$$\min \sum_t \sum_l cp^{eq} u_{tl} + \sum_t \sum_s \sum_l cp_s^{cg} y_{stl} \quad (6.17)$$

i pri sledećim ograničenjima:

$$u_{tl} \geq u_{(t-1)l}, \forall t, \forall l \quad (6.18)$$

$$u_{tl} \leq 2 \cdot u_{(t-1)l}, \forall t, \forall l \quad (6.19)$$

$$u_{tl} \leq u_{(t-1)l} + BM \cdot e_{tl}, \forall t, \forall l \quad (6.20)$$

$$u_{tl} \geq 2 \cdot u_{(t-1)l} + BM \cdot (1 - e_{tl}), \forall t, \forall l \quad (6.21)$$

$$e_{tl_1} = e_{tl_2}, \forall t, \forall (l_1, l_2) \in \Omega \quad (6.22)$$

$$u_{tl_1} = u_{tl_2}, \forall t, \forall (l_1, l_2) \in \Omega \quad (6.23)$$

$$x_{stl} + q_s u_{tl} \geq d_{tl}, \forall s, \forall t, \forall l \quad (6.24)$$

$$u_{tl} \geq 0, \forall t, \forall l \quad (6.25)$$

$$x_{tl} \geq 0, \forall t, \forall l \quad (6.26)$$

$$e_{tl} \in \{0,1\}, \forall t, \forall l. \quad (6.27)$$

Funkcijom cilja (6.17) minimiziraju se ukupni troškovi, koji se sastoje od troškova proširenja linka i troškova zagušenja linka. Ograničenjima (6.18)-(6.21) je definisana politika proširenja linka, dupliranjem kapaciteta, dok je ograničenjima (6.22)-(6.23) definisano istovremeno proširenje kapaciteta posmatranog para linkova, duž kojih se realizuje dvosmerni saobraćaj. Ograničenjem (6.24) se vrši proračun troškova zagušenja, dok se ograničenjima (6.25)-(6.27), deklariraju nenegativan karakter promenljivih  $c_{tl}$  i  $x_{tl}$ , kao i binarna promenljiva  $e_{tl}$ , respektivno.

#### 6.2.2.4 Strategija serijskog proširenja kapaciteta mrežnog linka sa funkcijom troškova zagušenja – heuristički pristup

Strategija proširenja predstavljena u prethodnom poglavlju, nudi mogućnost rešavanja problema heurističkim pristupom. Naime, funkcija cilja (6.17) kao i ograničenja (6.18)-(6.27), pružaju mogućnost superponiranja problema na pojedinačni par linkova  $(l_1, l_2)$  u slučaju dvosmernog saobraćaja, odnosno na pojedinačni link  $l$  u slučaju jednosmernog saobraćaja (u modifikaciji modela bez ograničenja (6.22)-(6.23)). Heuristički pristup podrazumeva izračunavanje troškova zagušenja i troškova proširenja kapaciteta, pojedinačno za svaki vremenski slot  $t$ . U slučaju posmatranog para linkova

$(l_1, l_2)$ , dodatni troškovi zagušenja u vremenskom slotu  $t$  mogu se predstaviti sledećim izrazom [98]:

$$\Delta C = cp^{cg} \left( \frac{y_{tl_1}}{u_{tl_1}} \right) + cp^{cg} \left( \frac{y_{tl_2}}{u_{tl_2}} \right) - cp^{cg} \left( \frac{y_{tl_1}}{2 \cdot u_{tl_1}} \right) - cp^{cg} \left( \frac{y_{tl_2}}{2 \cdot u_{tl_2}} \right) \quad (6.28)$$

kao i dodatni troškovi proširenja kapaciteta:

$$\Delta I = cp^i \cdot u_{tl_1} + cp^i \cdot u_{tl_2} \quad (6.29)$$

Proširenje kapaciteta posmatranog para linkova treba realizovati u trenutku  $t^*$ , kada vrednost dodatnih troškova zagušenja postane veća od dodatnih troškova proširenja, odnosno kada bude ispunjen uslov da je  $\Delta C > \Delta I$ . Imajući u vidu da je za realizaciju proširenja potrebno  $\Delta e$  vremenskih slotova, korespondentna odluka o realizaciji proširenja treba da bude doneta u vremenskom slotu  $t^* - \Delta e$  [98].

#### **6.2.2.5 Unapređena strategija serijskog proširenja modularnih kapaciteta mrežnog linka sa funkcijom troškova zagušenja i mogućnosti prelaska na novu tehnologiju**

Strategije proširenja kapaciteta mrežnih resursa, navedene u prethodnim poglavljima, odnose se na probleme proširenja kapaciteta mrežnih resursa, u slučajevima kada je topologija posmatrane mreže, kao i primenjena mrežna tehnologija definisana korespondentnim LTP ciljevima.

U ovom poglavlju se razmatra strategija proširenja mrežnih kapaciteta, čiji izbor je moguć u slučaju kada se među postavljenim LTP ciljevima predviđa promena tehnologije, usled rekonfiguracije posmatrane mreže (u sklopu *brown field* planskih aktivnosti). Tada je, za pripadajuće MTP periode, raspoloživi budžet modeliran na taj način da je u okviru strategija proširenja kapaciteta resursa mreže moguće uključiti i opciju promene tehnologije. Promenu tehnologija na nivou posmatrane mreže je moguće izvršiti kompletno ili parcijalno. Pri tome, treba imati u vidu da investitorima uvek više odgovara parcijalna nadgradnje mreže, što se može videti u radovima [132], [99]. Takođe, interes investitora je što duža eksploatacija već uvedenih tehnologija (veća povratna stopa investicije, ROI), sve do momenta kada opcija zamene tehnologije postaje neizbežna alternativa.

Shodno navedenom, u ovoj doktorskoj disertaciji predlaže se strategija proširenja mrežnih kapaciteta, koja uključuje mogućnost uvođenja nove mrežne tehnologije u eksploataciju, po istim principima koji važe za uvođenje mrežnih komponenti za proširenje kapaciteta u okviru već primenjenih tehnologija. Predložena strategija je bazirana na proširenju modela [98], prikazanog u poglavlju (6.2.2.3), imajući u vidu sledeće činjenice:

- strategija predstavljena u poglavlju (6.2.2.3), pretpostavlja dupliranje kapaciteta kao vid politike proširenja koja se sprovodi po donošenju odluke u optimalnom vremenskom trenutku. U modelu predložene strategije proširenja kapaciteta uvodi se politika modularnih kapaciteta [80], prikazana u poglavlju (6.2.2.2)
- model (6.2.2.3) nudi mogućnost superponiranja problema na pojedinačne linkove, čime se pruža mogućnost parcijalnog proširenja kapaciteta, kao i uvođenja nove tehnologije.
- model (6.2.2.3) nudi mogućnost rešavanja problema proširenja heurističkim pristupom, što važi i u slučaju predloženog modela.

Imajući navedeno u vidu, strategija serijskog proširenja modularnih kapaciteta mrežnog linka sa funkcijom troškova zagušenja i opcijom prelaska na novu tehnologiju, može se predstaviti na sledeći način: za mrežni link  $l$ , čije se proširenje kapaciteta razmatra na početku svakog vremenskog perioda  $\Delta p$ , pri čemu svaki vremenski period sadrži podjednak broj vremenskih slotova  $t$ . U ovom problemu, pretpostavljena je politika proširenja modularnih kapaciteta, predstavljena u poglavlju (6.2.2.2), takva da se na posmatranom linku  $l$ , svaki pojedinačni kapacitet  $u_{ktl}$  realizuje kroz određenu količinu  $a_{ktl}$  korespondentnog tipa mrežne opreme - modula  $k$ , ( $k \in K$ ).

Uvođenje nove tehnologije, dešava se u situaciji, kada na posmatranom linku  $l$ , u svakom od razmatranih vremenskih slotova  $t$ , nivo zagušenja ostaje iznad kritične vrednosti i pored proširenja kapaciteta, zbog čega troškovi zagušenja ostaju veći od troškova proširenja kapaciteta. Ovaj slučaj je ekvivalentan situaciji gde je u trenutku  $t_0$  odmah primenjeno proširenje (pravilo *Rule of Thumb*), ali je, i pored primenjenog proširenja, nivo zagušenja ostao iznad kritične vrednosti. U navedenoj situaciji, aktivira se odluka o zameni tehnologije  $f^{NTM}$ , inicirajući pojavu tzv. troškova migracije ka



novoj tehnologiji  $cp^{eqm}$ , koji zamenjuju troškove proširenja kapaciteta (koji su vezani za postojeću tehnologiju). U ovom modelu je pretpostavljeno da se zamena tehnologije u okviru planskih MTP aktivnosti, može izvršiti samo jednom.

Imajući navedeno u vidu, može se uvesti sledeća notacija:

a) *Oznake:*

$t = t_0, \dots, t_i, \dots, t_0 + \Delta T$	vremenski slot
$\Delta T$	horizont planiranja
$u_{kl}$	kapacitet modula tipa $k$ , instaliranog na posmatranom linku $l$
$y_{tl}$	intenzitet saobraćaja na linku $l$ , u vremenskom slotu $t$

b) *Parametri modela:*

$s = 1, \dots, S$	redni broj linearnog segmenta funkcije troškova zagušenja
$cp_{ktl}^{eq}$	troškovi proširenja kapaciteta, instalacijom modula tipa $k$ , na linku $l$ , u vremenskom slotu $t$
$cp_s^{cg}$	troškovi zagušenja na segmentu $s$ funkcije troškova zagušenja
$cp_l^{eqm}$	troškovi migracije linka $l$ na novu tehnologiju
$q_s$	donji nivo funkcije troškova zagušenja na segmentu $s$
$q_{100\%}$	donji nivo funkcije troškova zagušenja na segmentu sa totalnim zagušenjem (100%)
$BM$	dovoljno veliki broj, $BM \geq \max(s^{\Delta T-1} c_{kt})$

c) *Promenljive*

$x_{stl}$	deo intenziteta saobraćaja linka $l$ , koji pripada linearnom segmentu $s$ funkcije troškova zagušenja
$a_{ktl}$	broj nabavljenih i instaliranih modula tipa $k$ , na linku $l$ , u vremenskom slotu $t$

$de_{tl}$	binarna promenljiva, sa vrednošću 1 ako je kapacitet linka $l$ proširen u vremenu $t$ , odnosno 0 u suprotnom slučaju
$f_{tl}^{NTM}$	binarna promenljiva, sa vrednošću 1 ako je migracija na novu tehnologiju sprovedena u vremenu $\tau$ ( $\tau = t_0, \dots, t_0 + t$ ), odnosno 0 u suprotnom slučaju.

Na osnovu prikazane notacije, predstavljeni problem može se matematički formulisati u formi mešovitog celobrojnog linearnog programiranja (*Mixed Integer Linear Programming problem* - MILP), na sledeći način: neka je iskorišćenje posmatranog linka  $l$  predstavljeno odnosom:

$$\rho_l(t) = \frac{y_{tl}}{\sum_k u_{kl} \cdot a_{ktl}}, \quad (6.30)$$

tada se predloženi model može predstaviti sa sledećom funkcijom cilja:

$$\min \sum_t \sum_l \sum_k cp_{ktl}^{eq} a_{ktl} + \sum_t \sum_s \sum_l cp_s^{cg} x_{stl} + \sum_t \sum_l cp_l^{eqm} f_{tl}^{NTM} \sum_{\tau=t_0}^t \rho_l(\tau), \quad (6.31)$$

pri sledećim ograničenjima:

$$\sum_k u_{kl} a_{ktl} \geq \sum_k u_{kl} a_{k(t-1)l}, \quad \forall t, \forall l \quad (6.32)$$

$$\sum_k u_{kl} a_{ktl} \leq \sum_k u_{kl} (a_{k(t-1)l} + 1), \quad \forall t, \forall l \quad (6.33)$$

$$\sum_k u_{kl} a_{ktl} \leq \sum_k c_{kl} (u_{k(t-1)l} + BM \cdot de_{tl}), \quad \forall t, \forall l \quad (6.34)$$

$$x_{st} + q_s \cdot \sum_k u_{kl} a_{ktl} + f_{tl}^{NTM} \geq \rho_l(t), \quad \forall s, \forall t, \forall l \quad (6.35)$$

$$x_{st} + q_{100\%} \sum_k u_{kl} a_{ktl} \geq \sum_t \rho_l(t) f_t^{NTM}, \quad \forall t, s \in 100\%, \forall l \quad (6.36)$$

$$\sum_t \rho_l(t) \leq q_{100\%} de_{tl}, \quad \forall t, \forall l \quad (6.37)$$

$$\sum_t \rho_l(t) \geq q_{100\%} f_{tl}^{NTM}, \quad \forall t, \forall l \quad (6.38)$$

$$\sum_t f_{tl}^{NTM} \leq 1, \forall l \quad (6.39)$$

$$\sum_t de_{tl} \leq 1, \forall l \quad (6.40)$$

$$a_{ktl} \geq 0, \forall k, \forall t, \forall l \quad (6.41)$$

$$u_{kl} \geq 0, \forall k, \forall l \quad (6.42)$$

$$x_{stl} \geq 0, \forall s, \forall t, \forall l \quad (6.43)$$

$$de_{tl} \in \{0,1\}, \forall t, \forall l \quad (6.44)$$

$$f_{tl}^{NTM} \in \{0,1\}, \forall t, \forall l. \quad (6.45)$$

Funkcijom cilja (6.31) minimiziraju se ukupni troškovi na linku  $l$  koji se sastoje od troškova opreme  $\sum_t \sum_l \sum_k cp_{klt}^{eq} a_{klt}$ , troškova nastalih usled zagušenja posmatranog

linka  $\sum_t \sum_s \sum_l cp_s^{cg} x_{stl}$  i troškova migracije na novu tehnologiju  $\sum_t \sum_l cp_l^{eqm} f_{tl}^{NTM} \sum_{\tau=t_0}^l \rho_l(\tau)$ .

Troškovi opreme na linku  $l$ , zavise od broja instaliranih modula  $a_{klt}$  tipa  $k$ , sa cenom  $cp_{klt}^{eq}$  u vremenskom slotu  $t$ . Pošto cena modula posmatrane opreme opada tokom vremena, a troškovi zagušenja rastu, ukupni troškovi variraju tokom posmatranog horizonta planiranja. Ograničenjem (6.32) je obezbeđeno da ukupan kapacitet instaliranih modula, u vremenskom slotu  $t$ , ne može biti manji od ukupnog kapaciteta instaliranih modula u prethodnom vremenskom slotu  $(t-1)$ . Ograničenjima (6.33) i (6.34), obezbeđena je politika proširenja kapaciteta linka  $l$ , takva da broj modula tipa  $k$ , koje treba instalirati u toku posmatranog vremenskog slotu  $t$ , ne bude veći od jedan, u odnosu na prethodni vremenski slot  $t-1$ , što je dodatno obezbeđeno ograničenjem (6.40). U ograničenju (6.35) se proračunavaju troškovi nastali usled zagušenja posmatranog linka  $l$ , upotrebom funkcije troškova zagušenja [93] (predstavljenom u poglavlju 4.1.4.8), tako što se sumiraju nivoi penala posebno za svaki deo funkcije troškova zagušenja, koji pripada korespondentnom linearnom segmentu  $s$  [98]. Zadatak navedenog ograničenja je da na linku  $l$  spreči prerano instaliranje novog modula. Ovo

ograničenje takođe sadrži i promenljivu  $f_{il}^{NTM}$ , čiji je zadatak da spreči instalaciju novog modula, u trenutku kada treba sprovesti migraciju linka na novu tehnologiju.

Konačno vrednost treće komponente funkcije cilja, promenljive  $f_{il}^{NTM}$  (koja obezbeđuje migraciju linka na novu tehnologiju), zavisi od vrednosti nivoa zagušenja na posmatranom linku  $l$ , tokom svih vremenskih slotova koje pripadaju posmatranom horizontu planiranja. Naime, ova binarna promenljiva (koja ima inicijalnu vrednost nula) može promeniti svoju vrednost (u vrednost jedan) samo jednom. To je moguće u veoma specifičnom slučaju kada je nivo prognoziranih saobraćajnih zahteva toliko visok da bez obzira na proširenje kapaciteta nivo zagušenja linka ostaje jednak ili je veći od 100%, u svim posmatranim vremenskim slotovima. U ovom slučaju, proširenje kapaciteta, upotrebom postojeće tehnologije postaje besmisleno, zbog čega treba izvršiti migraciju posmatranog linka na novu tehnologiju. Mogućnosti promene vrednosti promenljive  $f_{il}^{NTM}$  su definisane ograničenjima (6.36)-(6.39). Tada se ukupnim troškovima dodaju troškovi migracije  $cp_l^{eqm}$  linka  $l$  na novu tehnologiju. Nadalje, ograničenjima (6.41)-(6.43), se obezbeđuju nenegativne vrednosti promenljivih  $a_{kl}$ ,  $u_{kl}$  i  $x_{stl}$ , dok se promenljivama  $de_{il}$  i  $f_{il}^{NTM}$  dodeljuje binarni karakter kroz ograničenja (6.44) i (6.45), respektivno.

Pored svoje inicijalne namene, izbor predložene strategije može biti primenjen i u slučaju kada korespondentnim LTP ciljem nije predviđena promena tehnologije. Ovo se odnosi na granični slučaj, kada usled ekstremnog porasta nivoa zahteva postoji objektivna mogućnost da:

- a) proširenje kapaciteta (niti bilo koja druga mera vezana za MTP aktivnosti) u okviru primenjenih tehnologija ne može garantovati efikasnu kontrolu nivoa zagušenja na posmatranim resursima, ili
- b) nivo troškova neophodnih za efikasnu kontrolu nivoa zagušenja usled primenjenih mera raste takvim trendom, da se postavlja pitanje isplativosti primene postojeće mrežne tehnologije.

U navedenim okolnostima, uvođenje nove mrežne tehnologije u eksploataciju predstavlja alternativu, kojom se može postići zadovoljavajući stepen kontrole nad

posmatranim nivoima zagušenja, ali uz neminovnu pojavu neusklađenosti MTP aktivnosti sa postavljenim LTP ciljem. Tada je neophodno sprovođenje dodatnih aktivnosti, koje su predstavljene u poglavlju 2.3.

### 6.2.2.6 Unapređena strategija serijskog proširenja modularnih kapaciteta mrežnog linka sa funkcijom troškova zagušenja i mogućnosti prelaska na novu tehnologiju – heuristički pristup

Strategija proširenja predstavljena u prethodnom poglavlju, nudi mogućnost rešavanja problema heurističkim pristupom. Kao što je već navedeno, funkcija cilja (6.31) kao i ograničenja, prikazana formulama (6.32)-(6.35), pružaju mogućnost superponiranja problema na nivo pojedinačnog linka  $l$ , gde treba izvršiti izračunavanje troškova zagušenja i troškova proširenja kapaciteta, pojedinačno za svaki vremenski slot  $t$ . Treba napomenuti da je na početku iterativnog postupka vrednost promenljive  $f_{tl}^{NTM}$  jednaka nuli, čime je označeno da se nisu ispunili uslovi za migraciju linka na novu tehnologiju. Imajući u vidu da je iskorišćenje posmatranog linka  $l$ ,  $\rho_l(t)$  predstavljeno relacijom (6.30), dodatni troškovi zagušenja, u posmatranom vremenskom slotu  $t$ , mogu se predstaviti sledećim izrazom [98]:

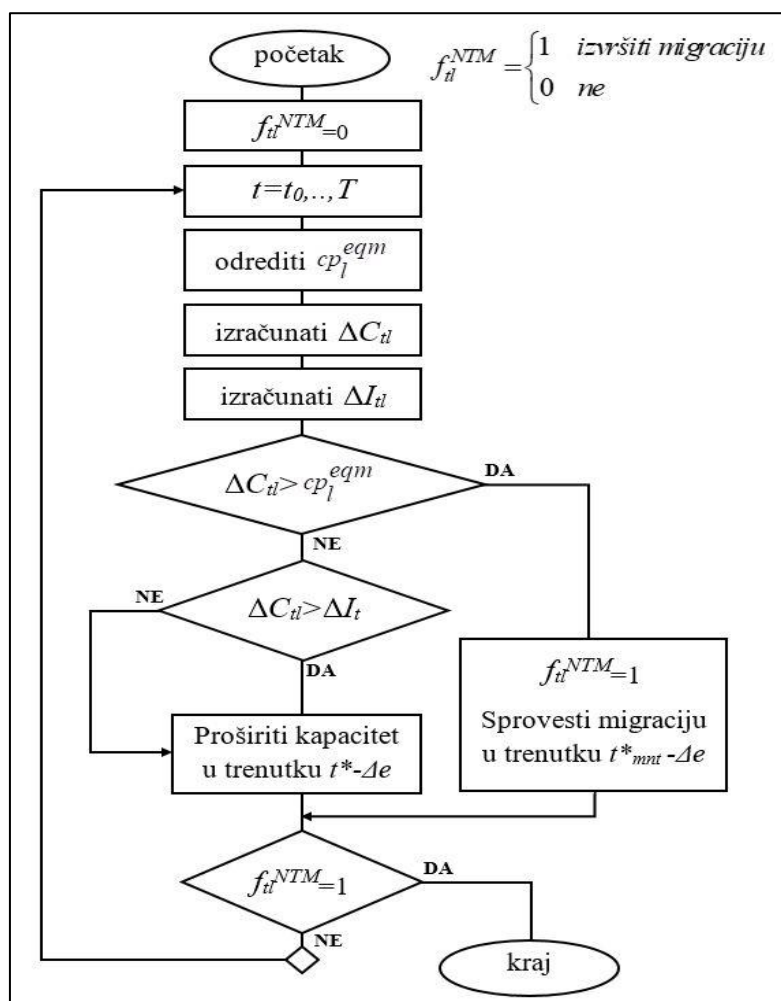
$$\Delta C_{tl} = cp^{cg} \left( \frac{y_{tl}}{\sum_k u_{kl} \cdot a_{ktl}} \right) - cp^{cg} \left( \frac{y_{tl}}{\sum_k u_{kl} (a_{k(t-1)l} + 1)} \right), \quad (6.46)$$

dok su dodatni troškovi proširenja kapaciteta:

$$\Delta I_{tl} = \sum_k cp_{ktl}^{eq} \cdot u_{kl} \cdot a_{ktl}, \quad (6.47)$$

a troškovi migracije na novu tehnologiju  $cp_l^{eqm}$ . Navedeni parametri se izračunavaju u svakom od ciklusa iterativnog postupka. Pri tome se proširenje kapaciteta posmatranog linka realizuje kada vrednost dodatnih troškova zagušenja postane veća od dodatnih troškova proširenja, odnosno kada se ispuni uslov da je  $\Delta C_{tl} > \Delta I_{tl}$  (u trenutku  $t^*$ ). Migracija na novu tehnologiju se izvršava kada je ispunjen uslov  $\Delta C_{tl} > cp_l^{eqm}$ , u trenutku  $t^*_{mnt}$ . Tada promenljiva  $f_{tl}^{NTM}$  dobija vrednost jedan, čime se ispunjava uslov

za prekid iterativnog postupka. Imajući navedeno u vidu, heuristički pristup se može predstaviti u obliku dijagrama toka, prikazanom na Slici 61:



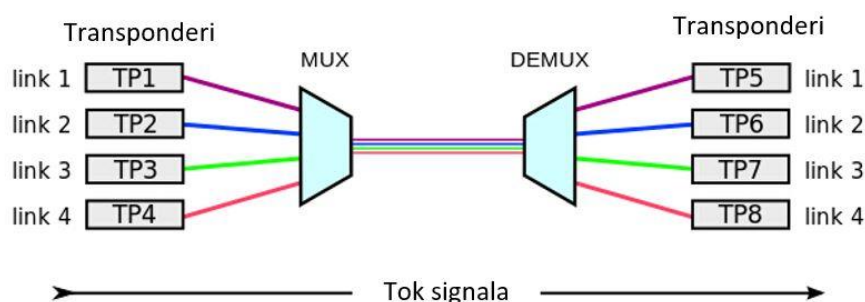
Slika 61. Dijagram toka heurističkog pristupa za predloženu strategiju

Imajući u vidu da je za realizaciju proširenja ili migraciju potrebno  $\Delta e$  vremenskih slotova, korespondentna odluka o realizaciji proširenja treba da bude doneta u vremenskom slotu  $t^* - \Delta e$  [98], odnosno  $t^*_{mnt} - \Delta e$ , respektivno.

## 7 PRIMENA UNAPREĐENE STRATEGIJE NA PROBLEM PROŠIRENJA KAPACITETA WDM LINKA

### 7.1 Uvod

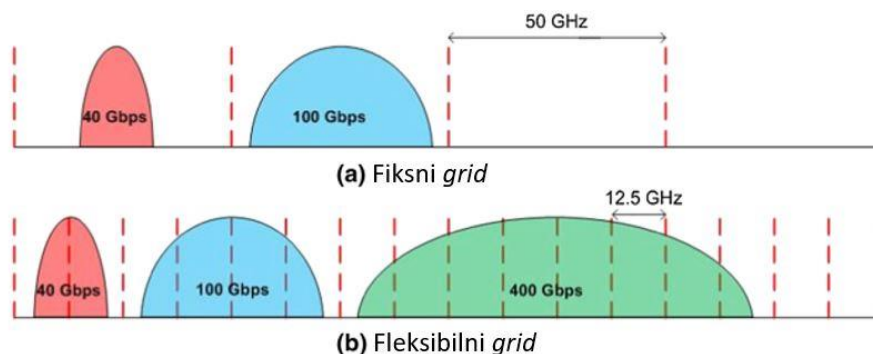
U današnjim transportnim mrežama, koje se koriste za transport agregiranog saobraćaja, najčešće je zastupljena upotreba *Wavelength Division Multiplexing* (WDM) tehnologija, čiji je rad baziran na uspostavi svetlosnih puteva, kojima se vrši prenos podataka. WDM transportne mreže su najčešće realizovane u varijanti tehnike gustog multipleksiranja (*Dense Wavelength Division Multiplexing*, DWDM), sa skupovima talasnih dužina u C-opsegu (1528-1561 nm) i L-opsegu (1561-1620 nm), pri čemu se, u slučaju fiksnih *grid* mreža (ITU-T G.692) [133], koriste skupovi uniformno raspoređenih talasnih dužina od 40, odnosno 80 talasnih dužina (kanala), sa fiksnim razmakom između kanala od 100 GHz, odnosno 50 GHz, respektivno. Na taj način se mogu postići standardni bitski protoci od 10 Gb/s i 40 Gb/s, a poslednjih godina i brzine do 100 Gb/s po talasnoj dužini (Slika 62). Osnovni nedostatak fiksne *grid* tehnologije je neracionalna upotreba spektralnih resursa, imajući u vidu činjenicu da se svakom saobraćajnom zahtevu dodeljuje celokupan raspoloživi kapacitet talasne dužine, nezavisno od njegove veličine (Slika 63).



Slika 62. Opšti prikaz koncepta DWDM sistema

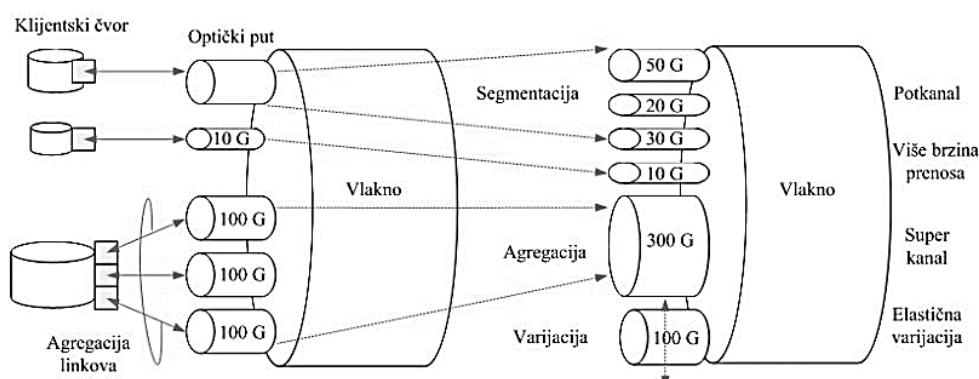
Imajući u vidu aktuelne trendove, vezane za internet servise (poput *Over-The-Top* servisa), postalo je sasvim izvesno da fiksna *grid* WDM tehnologija neće biti u mogućnosti da efikasno podrži sve buduće saobraćajne zahteve. Alternativa navedenom problemu, javlja se u rešenju koje se odnosi na primenu tehnologije fleksibilnog *grida* (*flex-grid*, ITU-T G.694.1), koja svoje parametre prilagođava individualnim

saobraćajnim zahtevima i aktuelnim transmisionim uslovima, maksimizirajući spektralnu efikasnost i povećanje transmisionih kapaciteta [134-137], (Slika 63).



Slika 63. Odnos širina kanala u odnosu na zahtev u slučaju fiksne (a) i fleksibilne (b) grid tehnologije

Upotrebom fleksibilnog rekonfigurabilnog optičkog *add/drop* multipleksera (*reconfigurable optical add-drop multiplexer*, ROADM) sa optičkim kros-konektorima promenljivog kapaciteta (*Bandwidth Variable Optical Cross-Connect*, BV-OXC) za rutiranje elastičnih puteva svetlosti, kao i adaptivnim optičkim primopredajnikom (*Bandwidth Variable Transponder*, BVT), pruža se mogućnost transporta agregiranih saobraćajnih zahteva grupisanjem više optičkih puteva (*superkanala*) koji za transport koristi odgovarajući broj frekvencijskih slotova širine 12.5GHz (Slika 64) [138], [139].



Slika 64. Grupisanje optičkih puteva u superkanal u fleksibilnim grid mrežama [138]

U ovom poglavlju biće predstavljen problem proširenja kapaciteta WDM linka, u posmatranoj fiksnoj *grid* mreži, pri čemu će biti razmotrena i mogućnost migracije na fleksibilnu *grid* tehnologiju. Za proširenje kapaciteta posmatranog linka biće upotrebljena strategija, predložena u poglavlju 6.2.2.5.

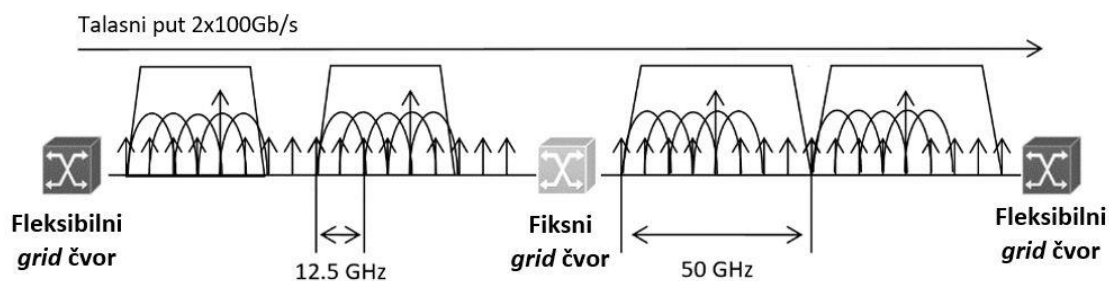


## 7.2 Koegzistencija fiksne i fleksibilne *grid* tehnologije

Uvođenje fleksibilnih *grid* tehnologija u optički domen predstavlja logičan pravac i nastavak u razvoju današnjih optičkih transportnih mreža [140], [141]. Međutim, migracija jedne kompletne optičke mreže na navedenu tehnologiju zahteva velike investicije, što najčešće nije prihvatljivo rešenje sa stanovišta investitora. Opcija parcijalne odnosno progresivne migracije pojedinih delova fiksne *grid* mreže na novu fleksibilnu *grid* tehnologiju, predstavlja vid kompromisnog rešenja za buduće transportne mrežne arhitekture. Međutim, koegzistencija tehnologija fiksnog i fleksibilnog grida zahteva rešavanje različitih problema njihovog međusobnog funkcionisanja [132], [99].

Pored pitanja vezanih za tehničku interoperabilnost navedenih tehnologija, u istraživanjima su razmatrani i mogući scenariji migracije mreže ka fleksibilnim *grid* tehnologijama [132], [99]. Jedan od mogućih scenarija odnosi se na formiranje grupe čvorova koji podržavaju fleksibilni *grid* ili tzv. *fleksibilno ostrvo*. *Ostrvo* se formira migracijom onog fiksnog *grid* čvora, čiji susedni čvor već podržava fleksibilni *grid*. Na taj način se otvara mogućnost realizacije *superkanala*, čime se i optički link koji povezuje navedene čvorove može smatrati *migriranim* na novu tehnologiju.

Na Slici 65, prikazan je primer koegzistencije gde je fiksni *grid* čvor lociran između dva čvora sa fleksibilnim *gridom*. U prikazanom primeru, jedan fleksibilni *grid* čvor generiše zahtev intenziteta 200Gb/s prema drugom fleksibilnom *grid* čvoru, preko fiksnog *grid* čvora, uspostavljajući 2 svetlosna puta (svaki sa kapacitetom 100Gb/s) [73].



Slika 65. Primer koegzistencije čvorova sa fiksnim i fleksibilnim *gridom* [73]

Povezivanje (migracijom) svakog susednog čvora sa posmatranim parom čvorova rezultuje uvećavanjem *fleksibilnog ostrva*. Na ovaj način je, u okviru samog *ostrva*, moguće maksimizirati vrednost saobraćaja koji se opslužuje. U zavisnosti od uslova moguće je formirati jedno ili više *ostrva*, jer mreža može imati nekoliko centara koji generišu veće količine saobraćaja od ostalih. Na taj način *ostrva* rastu sve dok se proces migracije u potpunosti ne završi, na nivou čitave mreže [99].

### 7.3 Pregled istraživanja

U istraživanjima vezanim za planiranje optičkih mreža sa fiksnom *grid* tehnologijom, predstavljeni su različiti pristupi rešavanju problema proširenja kapaciteta optičkih WDM linkova. Pickavet i Demeester [142], predložili su tri različita modela za rešavanje problema dimenzionisanja mrežnih kapaciteta u okviru LTP planskih aktivnosti, gde je analiziran njihov uticaj na smanjenje troškova kroz proces donošenja odluka o proširenju kapaciteta u zavisnosti od različite dinamike sprovođenja planskih aktivnosti. Melián, Laguna i Moreno-Pérez [143] su predstavili optimizacioni model za proširenje kapaciteta optičke mreže, u kojem su minimizirani troškovi dodavanja novih optičkih linkova, optičkih *cross-connect* uređaja (optical cross-connects, OXC), kao i drugih WDM komponenti na nivou posmatrane mreže. Treba napomenuti da su, u navedenom modelu, pretpostavljeni konkretni trendovi promene vrednosti razmatranih parametara, bez razmatranja neizvesnosti [73]. Na polju fleksibilnih *grid* tehnologija, Papanikolaou, Christodoulopoulos i Varvarigos [144] su predložili ILP model optimizacije CapEX troškova ugradnje modularnih IP/MPLS rutera u slučaju planiranja višeslojne mreže sa upotrebom fleksibilnih *grid* tehnologija. Shakya, et al. [145] su predložili ILP model i tri različita heuristička pristupa rešavanju problema optimizacije resursa spektra na osnovu prognoziranih vrednosti saobraćajnih zahteva.

Pored navedenog, istraživanja su obuhvatila i različite aspekte implementacije fleksibilnih *grid* tehnologija. Meusburger i Schupke su u svom radu [146] predstavili istraživanje uticaja primene metoda prognoziranja na odluke o rutiranju i agregaciji saobraćaja, posmatrano sa stanovišta kapitalnih troškova. Treba naglasiti da ove metode nisu bile vezane za prognoziranje nivoa saobraćajnih zahteva. Problemi parcijalne (graduelne) migracije fiksnih *grid* WDM mreža ka fleksibilnim *grid*

tehnologijama razmatrani su od strane nekoliko autora. U svom istraživanju, Tahon, et al. [147] razmatrali su uticaj neizvesnosti na investicione odluke u slučaju prognoziranja nivoa saobraćajnih zahteva, na osnovu čega su analizirali različite scenarije migracije. Ruiz, et al. su u svom radu [132], identifikovali *fleksibilno ostrvo* kao ključni element u procesu migracije. Na bazi navedenog, predložen je vremenski (*all-term*) dijagram toka vezan za proces migracije celokupne mreže, moguće probleme prilikom primene metoda optimizacije, kao i ključne činioce, vezane za proces planiranja koji uključuje fleksibilne *grid* tehnologije. Yu, et al. [99] su u svom radu razmatrali različite strategije migracije i izvršili analizu nekoliko scenarija, koji uključuju i koncept fleksibilnog ostrva. Treba napomenuti da je navedena grupa autora identifikovala problem koegzistencije fiksnih i fleksibilnih *grid* mreža kao važan istraživački izazov u kome tek treba dati odgovore na mnoga pitanja [99], [73].

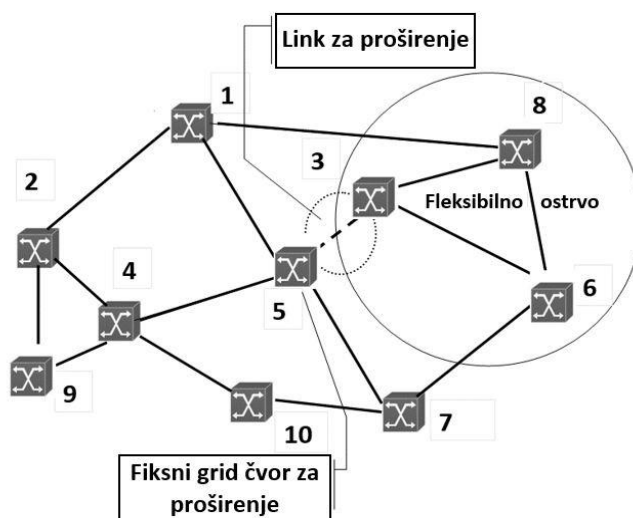
#### 7.4 Postavka problema i analizirani scenario

Scenario uvećanja *fleksibilnog ostrva* uvođenjem novog čvora implicitno upućuje na problem migracije korespondentnog linka ka novoj tehnologiji (Slika 66). Međutim, treba imati u vidu da interes investitora podrazumeva što dužu eksploataciju već uvedenih tehnologija (jer se želi što veća povratna stopa investicije, odnosno ROI), sve do momenta kada opcija zamene tehnologije postaje neizbežna alternativa. Kompromisno rešenje predstavlja izbor strategije predložene u poglavlju 6.2.2.5, u kojoj se kapacitet čvora (odnosno pripadajućeg linka) proširuje sve do trenutka:

- kada zagušenje posmatranog linka poraste na kritičan nivo, inicirajući pojavu rizika da mrežni resursi čvora i pripadajućeg linka ostanu bez raspoloživih kanala (talasnih dužina) ili
- kada nivo troškova neophodnih za efikasnu kontrolu nivoa zagušenja postane veći od troškova migracije.

Efekat zagušenja posmatranog linka može se posmatrati i kroz BBR parametar<sup>21</sup>, kada procenat neuspostavljenih svetlosnih puteva usled zagušenja poraste iznad kritične vrednosti.

Model za proširenje kapaciteta linka predložen u poglavlju 7.5, primenjen je na hipotetičkom primeru optičke WDM mreže prikazane na Slici 66.



Slika 66. Primer proširenja fleksibilnog ostrva migracijom fiksnog grid čvora i pripadajućeg linka [73]

Mreža se sastoji od 10 regionalnih i metro oblasti (MA), predstavljene preko odgovarajućih čvorova povezanih magistralnim linkovima.

Pretpostavlja se da je deo posmatrane mreže migriran ka tehnologiji fleksibilnog grida i da postoji formirano fleksibilno ostrvo (čvorovi 3, 6 i 8). U analiziranom scenariju, potrebno je odrediti optimalan plan proširenja kapaciteta za čvor broj 5 sa pripadajućim linkom.

## 7.5 Primena optimizacionog modela serijskog proširenja modularnih kapaciteta mrežnog linka

Problem pridruživanja posmatranog čvora (sa pripadajućim linkom) fleksibilnom ostrvu, može se posmatrati kao problem serijskog proširenja modularnih

<sup>21</sup> Poglavlje 4.1.4.6

kapaciteta mrežnog linka sa funkcijom troškova zagušenja i opcijom prelaska na novu tehnologiju, moguće je rešiti primenom predložene strategije u poglavlju 6.2.2.5. Da bi se optimizacioni model koji je u navedenom poglavlju matematički formulisan kao model celobrojnog mešovitog programiranja mogao primeniti, uvedene su sledeće pretpostavke:

1. Strategija proširenja se sprovodi za jedan link ( $l=1$ ).
2. Troškovi proširenja resursa odnose se na troškove proširenja posmatranog čvora (koji treba pridružiti *fleksibilnom ostrvu*), što uključuje nabavku odgovarajućih multipleksera i ostale DWDM opreme. Za potrebe numeričkog primera, usvojeno je da se troškovi posmatraju uopšteno, kroz cenu nabavke odgovarajućeg multipleksera. Takođe, usvojen je linearni trend pada cena tokom vremena.
3. Kapacitet linka se proširuje ili uvođenjem (aktiviranjem) nove talasne dužine (kanala) ili dodavanjem novog multipleksera. Kapacitet linka u trenutku  $t$  može se formulisati preko broja aktivnih talasnih dužina. U toku jednog horizonta planiranja kapacitet linka može biti proširen za 1 talasnu dužinu. Takođe, zamena multipleksera (MUX) moguća je samo ako su na posmatranom multiplekseru aktivirane sve talasne dužine. Usvojeno je da se kapacitet multipleksera duplira po zameni (na primer, MUX2  $\rightarrow$  MUX4, MUX4  $\rightarrow$  MUX8, itd.).
4. Treba da postoji ekvivalencija između broja modula  $a_{kl}$  i broja aktivnih talasnih dužina  $n_l$ . Kapacitet svakog modula  $c_{kl}$  jednak je kapacitetu talasne dužine  $c_{nl}$ , kapaciteta 40Gb/s.

Uvodi se sledeća notacija:

a) *Oznake:*

$t = t_0, t_1, \dots, t_i, \dots, t_0 + \Delta T$  vremenski slot

$\Delta T$  horizont planiranja

$u_{nl}$  kapacitet jedne talasne dužine (Gb/s)

$s = 1, \dots, S$	redni broj linearnog segmenta funkcije troškova zagušenja
b) Parametri modela:	
$t_0$	početni vremenski slot u periodu $\Delta p$
$\Delta T$	horizont planiranja
$y_{il}$	intenzitet saobraćaja na linku $l$ u vremenskom slotu $t$
$cp_t^{eq}$	troškovi proširenja kapaciteta u vremenskom slotu $t$
$cp_s^{cg}$	troškovi zagušenja na segmentu $s$ funkcije troškova zagušenja
$cp_l^{eqm}$	troškovi migracije linka $l$ na novu tehnologiju
$q_s$	donji nivo troškova linearnog segmenta $s$ funkcije troškova zagušenja
$q_{100\%}$	donji nivo funkcije troškova zagušenja na segmentu sa totalnim zagušenjem (100%)
$BM$	dovoljno veliki broj, $BM \geq \max(s^{\Delta T-1} c_{kt})$
c) Promenljive	
$x_{st}$	deo intenziteta saobraćaja linka $l$ , koji pripada linearnom segmentu $s$ funkcije troškova zagušenja
$\rho(t)$	iskorišćenje posmatranog linka $l$ , u vremenskom slotu $t$
$n_{lt}$	broj aktivnih talasnih dužina, na posmatranom linku $l$ , u vremenskom slotu $t$
$de_{il}$	binarna promenljiva, sa vrednošću 1 ako je kapacitet linka $l$ proširen vremenskom slotu $t$ , odnosno 0 u suprotnom slučaju
$f_t^{NTM}$	binarna promenljiva, sa vrednošću 1 ako je migracija na novu tehnologiju sprovedena u vremenu $\tau$

( $\tau \in t_0, \dots, t_0+t$ ), odnosno 0 u suprotnom slučaju.

Ako  $y_t$  predstavlja prognozirani intenzitet saobraćaja širokopojasnih korisnika prikazan u poglavlju 3.4.5, iskorišćenje posmatranog fiksnog *grid* linka može se predstaviti kao:

$$\rho(t) = \frac{y_t}{u_{nl} n_{lt}} \quad (6.48)$$

na osnovu čega, modifikovana funkcija cilja ima sledeći oblik:

$$\min \sum_t cp_t^{eq} n_{lt} + \sum_t \sum_s cp_s^{cg} \cdot x_{st} + \sum_t cp^{eqm} f_t^{NTM} \sum_{\tau=t_0}^t \rho(\tau) \quad (6.49)$$

pri sledećim ograničenjima:

$$n_{lt} \geq n_{l(t-1)}, \forall t \quad (6.50)$$

$$n_{lt} \leq n_{l(t-1)} + 1, \forall t \quad (6.51)$$

$$n_{lt} \leq n_{l(t-1)} + BM \cdot de_t, \forall t \quad (6.52)$$

$$x_{st} + q_s n_{lt} + f_t^{NTM} \geq \rho(t), \forall s, \forall t \quad (6.53)$$

$$x_{st} + q_{100\%} n_{lt} \geq \sum_t \rho(t) f_t^{NTM}, \forall t, s \in 100\% \quad (6.54)$$

$$\sum_t \rho(t) \geq q_{100\%} f_t^{NTM}, \forall t \quad (6.55)$$

$$\sum_t \rho(t) \geq \sum_t f_t^{NTM}, \forall t \quad (6.56)$$

$$\sum_t f_t^{NTM} \leq 1, \forall t \quad (6.57)$$

$$\sum_t de_t \leq 1, \forall t \quad (6.58)$$

$$n_{lt} \geq 0, \forall t \quad (6.59)$$

$$x_{st} \geq 0, \forall s, \forall t \quad (6.60)$$

$$de_t \in \{0,1\}, \forall t \quad (6.61)$$

$$f_t^{NTM} \in \{0,1\}, \forall t \quad (6.62)$$

Funkcijom cilja (6.49) minimiziraju se ukupni troškovi na posmatranom linku koji se sastoje od troškova opreme, troškova nastalih usled zagušenja posmatranog linka i troškova migracije na novu tehnologiju.

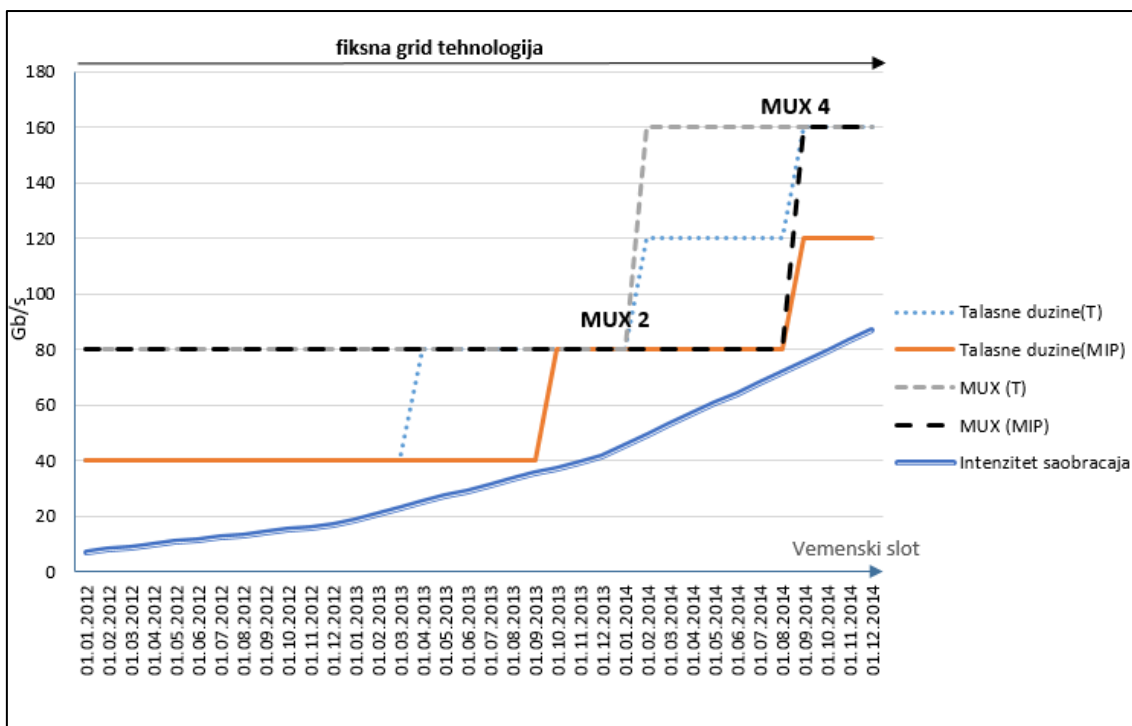
Troškovi opreme na posmatranom linku zavise od broja talasnih dužina, koje je moguće aktivirati na postojećem ili dodatnom multipleksu koji u slučaju potrebe treba nabaviti u vremenskom slotu  $t$  sa cenom  $cp_t^{eq}$ . Ograničenjem (6.50) obezbeđeno je da ukupan broj talasnih dužina u vremenskom slotu  $t$ , ne može biti manji od broja talasnih dužina u prethodnom vremenskom slotu  $(t-1)$ . Ograničenjima (6.51)-(6.52) i (6.58), obezbeđena je politika proširenja kapaciteta linka za jednu talasnu dužinu u toku horizonta planiranja. U ograničenju (6.53) proračunavaju se troškovi nastali usled zagušenja posmatranog linka  $l$  upotrebom funkcije troškova zagušenja [93], tako što se sumiraju nivoi penala posebno za svaki deo funkcije troškova zagušenja koji pripada korespondentnom linearnom segmentu  $s$  [98]. Ovo ograničenje takođe sadrži i promenljivu  $f_t^{NTM}$  (koja definiše migraciju linka na novu tehnologiju), koja zavisi od vrednosti nivoa zagušenja na posmatranom linku tokom svih vremenskih slotova koje pripadaju posmatranom horizontu planiranja. Vrednost promenljive  $f_t^{NTM}$ , uslovljena je ograničenjima (6.54)-(6.57), prema kojima ova binarna promenljiva može promeniti svoju vrednost samo jednom kada je nivo prognoziranih saobraćajnih zahteva toliko visok da bez obzira na proširenje kapaciteta nivo zagušenja linka biva jednak ili veći od 100%, u svim posmatranim vremenskim slotovima. Promenom vrednosti  $f_t^{NTM}$  inicira se migracija posmatranog linka na novu tehnologiju, pri čemu se ukupnim troškovima dodaju troškovi migracije  $cp^{eqm}$ . Konačno, ograničenjima (6.59)-(6.60), se obezbeđuju nenegativne vrednosti promenljivih  $n_{lt}$  i  $x_{stl}$ , dok se promenljivama  $de_t$  i  $f_t^{NTM}$  definiše binarni karakter kroz ograničenja (6.61) i (6.62), respektivno.



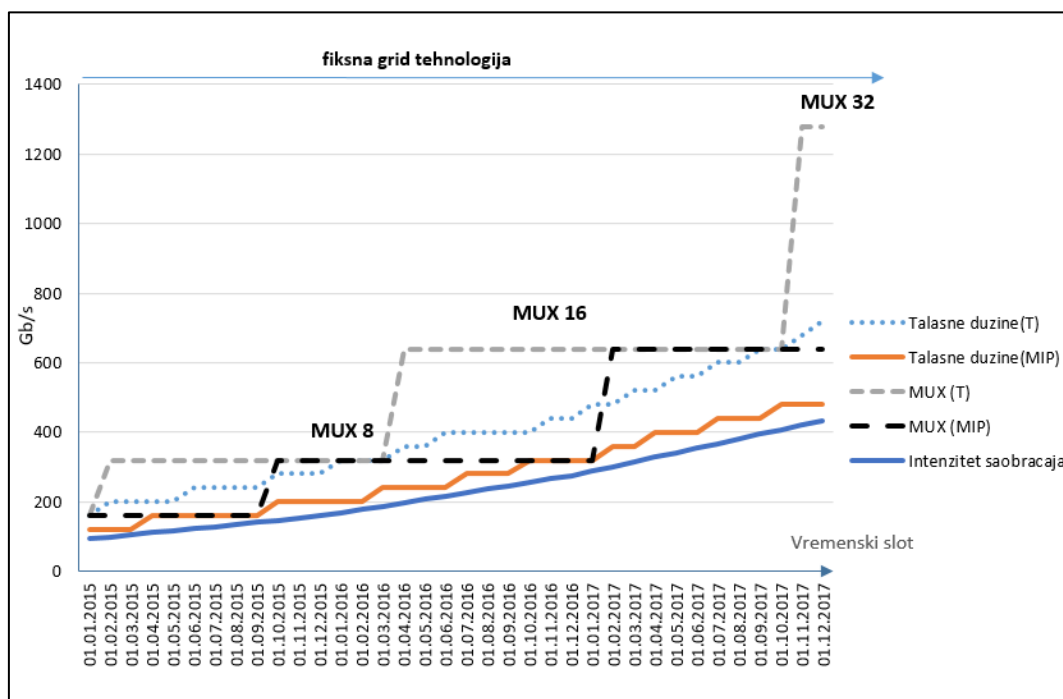
## 7.6 Prikaz rezultata

Za primenu strategije proširenja kapaciteta posmatranog linka (označene kao *MIP strategija*), predstavljene modelom u prethodnom poglavlju (7.5), usvojeno je da jedan vremenski slot odgovara jednom kalendarskom mesecu ( $\Delta t=1$ ) i da se odluka o proširenju kapaciteta razmatra svaka tri meseca ( $\Delta p=3$ ), pri čemu je period realizacije odluke o proširenju takođe tri meseca ( $\Delta e=3$ ). Na osnovu navedenog, horizont planiranja je 5 meseci, odnosno  $\Delta T = \Delta p + \Delta e - 1 = 5$ . Usvojena je funkcija troškova zagušenja [98], prikazana u poglavlju (4.1.4.8). Pored navedenog, usvojen je da generalni odnos između nivoa troškova proširenja kapaciteta i troškova zagušenja (6.16), ima vrednost  $r=1$ , u odnosu na referentnu vrednost do 60% [93]. Na ovaj način, moguće je porediti rezultate primene navedene strategije sa rezultatima primene heurističke strategije proširenja kapaciteta mrežnog linka bazirane na pragu iskorišćenja (*T strategija*, poglavlje 6.2.2.1), za koju je usvojena vrednost  $l_a=0$  [93], odnosno da se u tom slučaju primenjuje pravilo *Rule of Thumb*, koje predstavlja čest izbor mrežnih operatora [93]. Intenziteti prognoziranih saobraćajnih zahteva prikazani su u poglavlju 3.4.5. U disertaciji je razmatrano devet srednjoročnih (MTP) strategija proširenja kapaciteta posmatranog linka (po tri na dugoročnom nivou) u trajanju od po godinu dana. Pošto je prognoziranje navedenih intenziteta saobraćajnih zahteva vršeno na godišnjem nivou, vrednosti na mesečnom nivou su dobijene primenom linearne interpolacije.

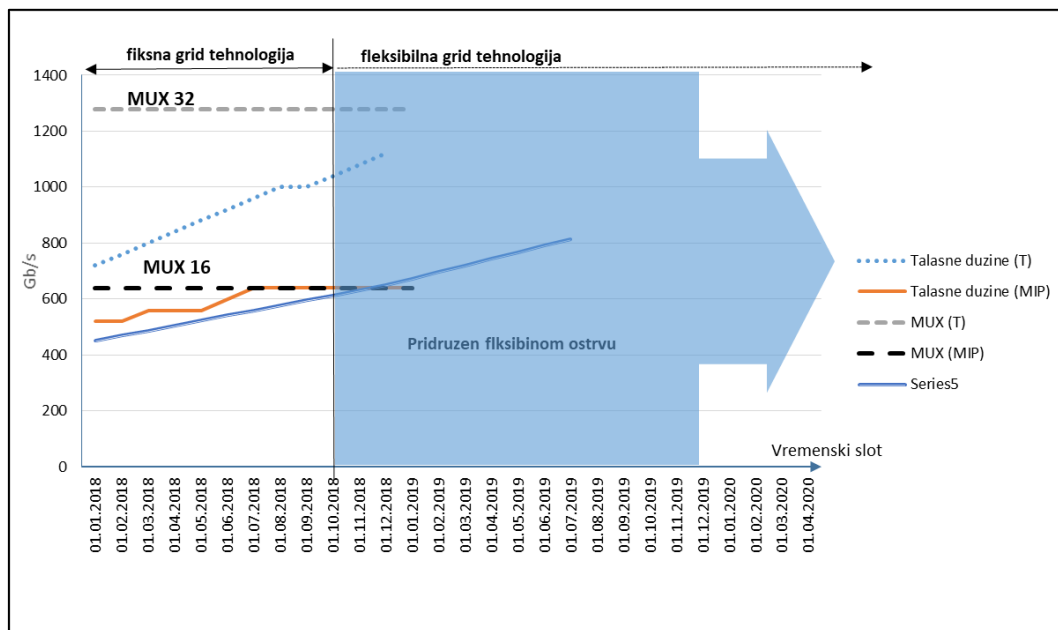
Dobijeni rezultati su prikazani u Prilogu 3, Tabela 1. Za proračun pada vrednosti cena opreme tokom vremena upotrebljena je formula (5.6) predstavljena u poglavlju 5.2.2.2. Za proračun vrednosti cena na mesečnom nivou, upotrebljena je linearna interpolacija (Prilog 2, Tabela 4). Treba imati u vidu da u toku primene modela nije bilo moguće doći do egzaktnih podataka o cenama opreme, zbog čega su usvojene određene vrednosti na osnovu uvida u [120]. Uzeta je u obzir pretpostavka da se oprema neophodna za migraciju na fleksibilnu *grid* tehnologiju kasnije pojavila na tržištu u poređenju sa fiksnom *grid* tehnologijom, zbog čega je usvojeno da se pad cene opreme neophodne za migraciju računa od početka 2014. godine. Imajući u vidu navedeno, strategije proširenja kapaciteta posmatranog linka prikazane su na slikama 67-69, u Tabeli 14, kao i objedinjenim prikazom za sve dugoročne periode (Slika 70).



Slika 67. MTP strategije proširenja za LTP period 2012-2014



Slika 68. MTP strategije proširenja za LTP period 2015-2017

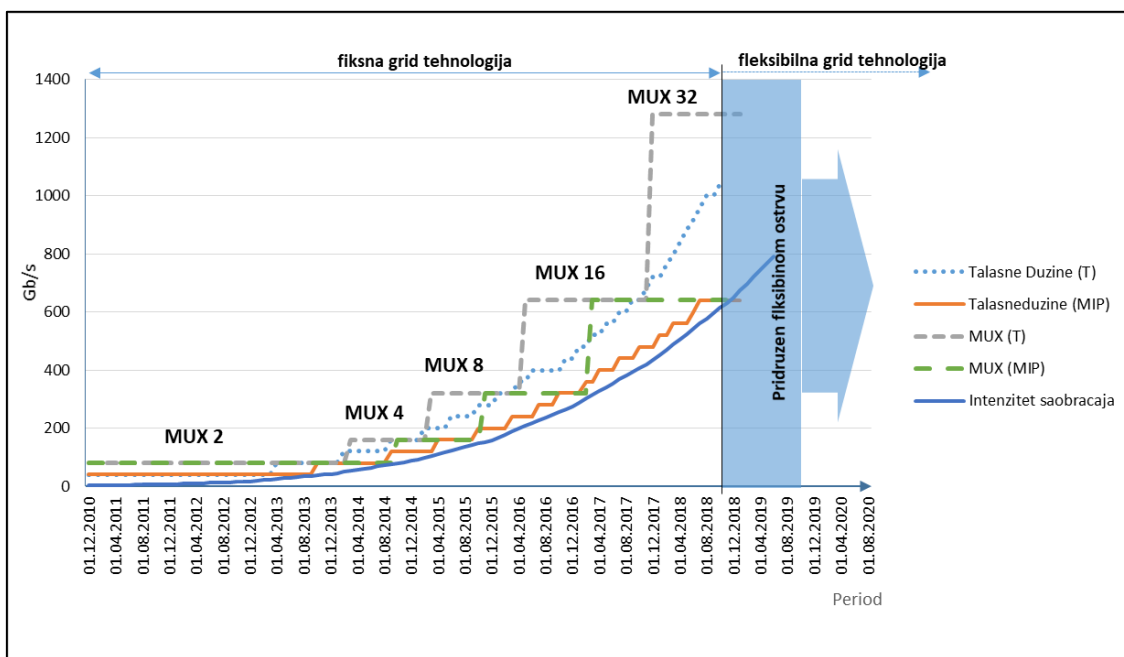


Slika 69. MTP strategije proširenja za LTP period 2018-2020

Detaljan prikaz primene optimizacionog modela proširenja kapaciteta posmatranog linka, u svim posmatranim MTP periodima, prikazan je u Prilogu 3, Tabela 1.

Tabela 14. Uporedni pregled svih proširenja tokom sva tri LTP perioda primenom T i MIP strategije

Period		Vremenski slot	Instalacija kanala		Nadgradnja MUX		Zagušenje u trenutku zamene (%)	
LTP	MTP		T	MIP	T	MIP	T	MIP
1	2	31.04.2013	X				62.31	
	2	31.10.2013		X				93.34
	3	28.02.2014	X		MU <sub>x2</sub> >MUX4		61.29	
	3	30.09.2014	X	X		MU <sub>x2</sub> >MUX4	62.91	94.37
2	1	28.02.2015	X		MU <sub>x4</sub> >MUX8		61.75	
	1	30.04.2015		X				92.29
	1	30.06.2015	X				61.36	
	1	31.10.2015	X	X		MU <sub>x4</sub> >MUX8	61.10	91.64
	2	31.01.2016	X				60.10	
	2	31.03.2016		X				93.83
	2	30.04.2016	X		MU <sub>x8</sub> >MUX16		61.67	
	2	30.06.2016	X				60.21	
	2	31.07.2016		X				94.35
	2	31.10.2016		X				91.26
	2	31.11.2016	X				66.30	
	3	31.12.2016	X				65.48	
	3	28.02.2017		X		MU <sub>x8</sub> >MUX16		94.17
	3	31.03.2017	X				65.54	
	3	30.04.2017		X				91.06
	3	31.05.2017	X				65.58	
	3	31.07.2017	X	X			65.62	91.87
	3	30.09.2017	X				65.66	
	3	31.10.2017		X				92.54
	3	30.11.2017	X		MU <sub>x16</sub> >MUX32		65.69	
3	31.12.2017	X				63.77		
3	1	31.01.2018		X				94.09
	1	28.02.2018	X				65.22	
	1	31.03.2018	X	X			64.16	93.77
	1	30.04.2018	X				63.20	
	1	31.05.2018	X				62.33	
	1	30.06.2018	X	X			61.54	96.71
	1	31.07.2018	X	X			60.82	93.26
	1	31.08.2018	X				60.16	
	1	30.09.2018		<b>FLEX</b>				93.05
<b>Ukupno zamena</b>			<b>24</b>	<b>15+M</b>	<b>Prosečno opterećenje u momentu zamene (%)</b>		<b>63.06</b>	<b>93.22</b>

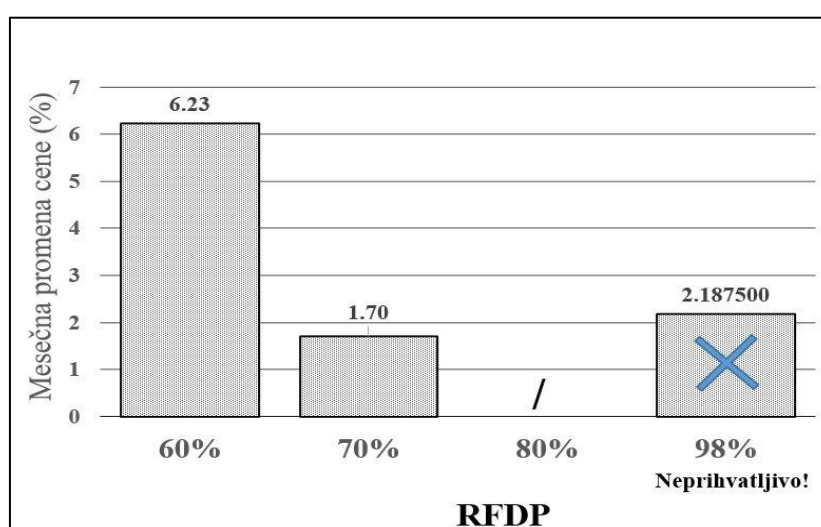


Slika 70. Opšti prikaz strategije proširenja za LTP periode 2012-2020

Zbog relativno niskog priraštaja intenziteta saobraćaja prilikom određivanja svih MTP strategija za LTP periode 2012-2014 i 2015-2017, nije uzimana u obzir mogućnost migracije posmatranog linka (sa pripadajućim čvorom) ka fleksibilnim tehnologijama. Ova opcija razmatrana je tek u MTP strategijama u okviru LTP perioda 2018-2020, gde je utvrđeno da je posmatrani link (odnosno njegov pripadajući čvor) potrebno migrirati na početku drugog MTP perioda (odnosno u oktobru 2018. godine). Imajući u vidu karakteristike fleksibilnih tehnologija, nakon donošenja odluke o migraciji nisu nadalje razmatrane odluke o proširenju za posmatrani link. Primenom metode optimizacije ukupno je izvršeno 15 proširenja kapaciteta sa tri nadgradnje multipleksera, sa prosečnim iskorišćenjem linka 93,22% u momentu proširenja. Sa druge strane, primenom heurističke T strategije u skladu sa [93], ukupno je izvršeno 24 proširenja sa četiri nadgradnje multipleksera, pri prosečnom iskorišćenju od 62,72%.

Pored primene predloženog optimizacionog modela, izvršena je i analiza osetljivosti. Ona bi trebalo da pokaže kolika je minimalna mesečna stopa pada cene koja utiče na model tako da odluka bude odložena za jedan vremenski slot  $t$ , u odnosu na donji nivo troškova  $q_s$  linearnog segmenta  $s$  funkcije troškova zagušenja (nadalje u tekstu – referentna vrednost za definisanje penala - RFDP) [96]. Za analizu su odabrane RFDP vrednosti od 60%, 70% i 80%, pri čemu je posmatrana promena perioda za nivoe

iskorišćenosti aktivnih talasnih dužina u opsegu od 89% do 95%. Treba napomenuti da analizom nije uključena mogućnost migracije linka. Rezultati analize osetljivosti pokazali su da je za posmatrani opseg iskorišćenosti aktivnih talasnih dužina pri *RFDP* od 60%, potreban mesečni pad cene opreme od 6,23%, da bi odluka o realizaciji proširenja bila odložena za 1 jedan vremenski slot. U slučaju *RFDP* od 70%, dovoljan je mesečni pad cene od 1,7%, dok u slučaju *RFDP* od 80%, mesečni pad cena nije utvrđen, odnosno, mesečna promena od 2,1875% postoji tek pri iskorišćenosti aktivnih talasnih dužina od 98%, što se ne može smatrati prihvatljivom vrednošću, pošto navedeno zagušenje dovodi do značajnog pada performansi linka (Slika 71) [96].



Slika 71. Nivoi zagušenja (%) aktivnih kanala pri različitim stopama pada cene u odnos

Takođe, uočena je određena varijacija nivoa iskorišćenosti aktivnih talasnih dužina pri različitim mesečnim stopama pada cene, u odnosu na koje se donosi odluka o proširenju kapaciteta a koja je uočljiva pri *RFDP* od 70% (Tabela 15) [96].

Tabela 15. Nivoi iskorišćenosti (%) aktivnih talasnih dužina pri različitim mesečnim stopama pada cene

RFDP (%)	Mesečna stopa promene cene opreme (%)			
	0.5	1	2.5	5
60	91	91	91	91
70	93	93	94	95
80	98	98	98	nema

Pored navedene analize, rezultati dobijeni primenom predloženog modela optimizacije su u skladu sa rezultatima, dobijenim u poglavljima 3.4.5 i 4.1.4.9.

## 8 ZAKLJUČNA RAZMATRANJA I PRAVCI DALJIH ISTRAŽIVANJA

### 8.1 Zaključna razmatranja

Posmatrajući aktuelne trendove vezane za internet servise (poput društvenih mreža, *Over-The-Top* servisa, servisa na nivou oblaka (cloud) i sl.), može se uočiti da pravila ponašanja internet tržišta postaju respektabilan faktor u dinamici saobraćajnih zahteva. Imajući u vidu sve veću zastupljenost internet tehnologija u savremenom društvu, može se uočiti da su problemi proširenja kapaciteta mrežnih resursa pored sagledavanja tehničkog aspekta u izuzetnoj korelacionoj vezi sa prognoziranom tražnjom na telekomunikacionom tržištu. Sagledavajući karakteristike savremenog tržišta, može se uočiti priroda ponašanja korisnika tradicionalnih telekomunikacionih i internet servisa koja definiše broj imitatora ili inovatora na tržištu, kao i potencijal tržišta svakog pojedinačnog servisa. Zahvaljujući ovakvom profilisanju sadašnjih i budućih korisnika na tržištu, može se prognozirati brzina prihvatanja novih telekomunikacionih servisa kao važan parametar za procenu ukupne tražnje, procene rizika opravdanosti investiranja u servise/proizvode, planiranja finansijskih sredstava i dr.

Shodno navedenom, u ovoj doktorskoj disertaciji razmatrane su strategije proširenja mrežnih resursa u kontekstu primene različitih metoda planiranja telekomunikacionih mreža. Da bi se mogla sagledati mogućnost primene odgovarajućih metoda, u disertaciji su na sistematizovan način predstavljeni opšti elementi metodologije planiranja. U fokusu istraživanja nalaze se strategije za proširenje mrežnih kapaciteta čiji izbor reflektuje kompromis između potrebe vezane za implementaciju novih mrežnih tehnologija i interesa investitora koji podrazumeva što dužu eksploataciju već uvedenih tehnologija. Kompromisno rešenje predstavlja izbor strategije predložene u disertaciji, po kojoj se kapacitet mrežnog resursa proširuje sa novim komponentama već implementirane tehnologije, sve do trenutka kada ovakav vid proširenja prestane da pruža zadovoljavajući odgovor na rastući nivo saobraćajnih zahteva ili kada nivo troškova neophodnih za efikasnu kontrolu nivoa zagušenja postane

veći od troškova migracije tehnologija. Prilikom analize navedenog rešenja uočeno je da Funkcija troškova zagušenja može imati važnu ulogu u procesu primene strategija za proširenje kapaciteta. Pri tome se ima u vidu mogućnost reflektovanja troškova mrežnog operatora u situaciji zagušenja linka, kada usled degradacije performansi mreže dolazi do nezadovoljstva korisnika i posredno do pada prihoda. Kao osnova za sprovođenje navedene strategije proširenja kapaciteta, upotrebljeni su prognozirani saobraćajni zahtevi bazirani na primeni *Bass*-ovog difuzionog modela. Izbor *Bass*-ovog modela zasniva se na činjenici da je u dosadašnjim istraživanjima primena ovog difuzionog modela pokazala visoku preciznost modeliranja krive prihvatanja novih širokopoljnih servisa. Primenom predloženog modela na primeru WDM mreže, utvrđena su vremena proširenja kapaciteta posmatranog čvora sa opremom fiksnog grida, kao i optimalno vreme migracije na novu, fleksibilnu *grid* tehnologiju.

Istraživanje prikazano u ovoj disertaciji, vezano je i za izbor adekvatnih parametara za karakterizaciju mrežnog saobraćaja sa ciljem da se smanji uticaj neizvesnosti prognoziranih podataka na određenu odluku o proširenju kapaciteta. U tom smislu, izvršena je analiza na osnovu koje je utvrđeno da se poređenjem vrednosti nivoa penala funkcije troškova zagušenja i vrednosti parametra Verovatnoće blokiranja kapaciteta, može odrediti vremenski period za sprovođenje odluke o migraciji tehnologija u posmatranom slučaju. Funkcija troškova zagušenja izabrana je zbog mogućnosti da se kroz vrednosti nivoa penala u opsegu kritičnih vrednosti zagušenja linka mogu naglasiti razlike između malih skokova nivoa zagušenja. Istovremeno, vrednosti parametra Verovatnoće blokiranja kapaciteta mogu ukazati na eventualnu degradaciju performansi mreže.

## 8.2 Doprinosi disertacije

Imajući u vidu navedeno, u ovoj doktorskoj disertaciji razmatrane su strategije proširenja mrežnih resursa u kontekstu primene različitih metoda planiranja telekomunikacionih mreža. Kao najvažniji naučni doprinosi disertacije, mogu se izdvojiti sledeći naučni doprinosi:

- U strategije za proširenje mrežnih kapaciteta, implementirane su prognozirane vrednosti saobraćajnih zahteva, zasnovane na primeni teorije difuzionih modela.



Pokazano je da se primenom ove teorije može na najpogodniji način modelirati brzina difuzije odnosno proces prihvatanja i širenja novih servisa na telekomunikacionom tržištu.

- Predložen je novi optimizacioni model, kao modifikacija modela strategije serijskog proširenja kapaciteta mrežnog linka, gde se odluka o proširenju bazira na prognoziranim vrednostima intenziteta saobraćaja, vrednostima kapaciteta posmatranih linkova, kao i cene opreme neophodne za realizaciju proširenja. Takođe, predloženi model ima mogućnost donošenja odluke o migraciji ka novoj tehnologiji kada i pored proširenja postojećih resursa mreže nema zadovoljavajućeg odgovora na rastući nivo saobraćajnih zahteva ili kada nivo troškova neophodnih za efikasnu kontrolu zagušenja postane veći od troškova migracije tehnologija.
- Predložen je pristup za smanjenje uticaja neizvesnosti prognoziranih podataka na određenu odluku o proširenju kapaciteta, zasnovan na izboru adekvatnih parametara za karakterizaciju mrežnog saobraćaja. Funkcija troškova zagušenja i vrednosti parametra Verovatnoće blokiranja kapaciteta su prepoznate kao bitne karakteristike za sprovođenje odluke o migraciji tehnologija. U tom smislu, izvršena je analiza na osnovu koje je utvrđeno da se poređenjem vrednosti nivoa penala funkcije troškova zagušenja i vrednosti parametra Verovatnoće blokiranja kapaciteta, može odrediti vremenski period za sprovođenje odluke o migraciji tehnologija u posmatranom slučaju. Zaključeno je da primena navedenih parametara može uticati na smanjenje neizvesnosti, koja je prisutna u primeni prognoziranih podataka.

### **8.3 Pravci budućih istraživanja**

Prilikom sprovedenog istraživanja imalo se u vidu da je primena predloženog modela, kao i analiza izbora parametara za karakterizaciju saobraćaja realizovana sa odgovarajućim nizom pretpostavki, uzimajući u obzir generalne principe metodologije planiranja mreže koja nalaže određeni nivo uopštavanja posmatranih problema na MTP i LTP nivou. Shodno navedenom, dalji tok istraživanja biće usmeren u pravcu razvoja predloženog optimizacionog modela na mrežu u kojoj je prisutan veći broj različitih tehnologija, na mogućnost primene više troškovnih modela, na primenu različitih modela za prognoziranje saobraćaja, na ispitivanju dodatnih uslova za izbor parametara

za karakterizaciju saobraćaja, kao i ispitivanju mogućnosti primene drugih parametara na osnovu kojih se uticaj neizvesnosti na donošenje odluka o proširenju resursa mreže može dodatno umanjiti.

---

## LITERATURA

- [1] J. Chawki, A. J. Ramos, H. Gaspar, E. Sampaio, R. Ries, R. Herber, P. Gavignet, A. Hamel, F. Tillerot, G. Paksy, T. Almeida, A. J. Ramos, D. R. Hjelme and M. Luyten, "EURESCOM Project P709: Planning of Full Optical Network, Deliverable 1: Considerations on Optical Network Architectures: Functionalities, Configurations and Client Signals," EURESCOM, 1999.
- [2] Cisco Systems, *Capacity and Performance Management: Best Practices White Paper*, Cisco Systems, 2005.
- [3] Cisco Systems, *Best Practices in Core Network Capacity Planning*, Cisco Systems, 2013.
- [4] T. Jensen, "Network Planning – Introductory Issues," *TELEKTRONIKK*, vol. 99, no. 3/4, pp. 9-47, 2003.
- [5] ITU-T, "Recommendation E.175: Models for international network planning," International Telecommunication Union, 1988.
- [6] S. Verbrugge, K. Casier, J. V. Ooteghem and B. Lannoo, "White Paper: Practical steps in techno-economic evaluation of network deployment planning," *UGent/IBBT: Gent, Belgium*, p. 45, 2009.
- [7] ITU, *Recommendation E.413 : International network management - Planning*, International Telecommunication Union, 1988.
- [8] ITU, *Recommendation E.711 : User demand modelling*, International Telecommunication Union, 1992.
- [9] ITU, *Recommendation E.712 : User plane traffic modelling*, International Telecommunication Union, 1992.
- [10] ITU, *Recommendation E.713 : Control plane traffic modelling*, International Telecommunication Union, 1992.

- 
- [11] ITU, *Recommendation E.760 : Terminal mobility traffic modelling*, International Telecommunication Union, 2003.
- [12] ITU, *Recommendation E.523 : Standard traffic profiles for international traffic streams*, International Telecommunication Union, 1988.
- [13] ITU, *Recommendation E.490 : Traffic measurement and evaluation - General survey*, International Telecommunication Union, 1992.
- [14] ITU, *Recommendation E.490.1 : Overview of Recommendations on traffic engineering*, International Telecommunication Union, 2003.
- [15] ITU, *Recommendation E.491 : Traffic measurement by destination*, International Telecommunication Union, 1997.
- [16] ITU, *Recommendation E.500 : Traffic intensity measurement principles*, International Telecommunication Union, 1998.
- [17] ITU, *Recommendation E.501 : Estimation of traffic offered in the network*, International Telecommunication Union, 1997.
- [18] ITU, *Recommendation E.503 : Traffic measurement data analysis*, International Telecommunication Union, 1992.
- [19] ITU, *Recommendation E.504 : Traffic measurement administration*, International Telecommunication Union, 1988.
- [20] ITU, *Recommendation E.505 : Measurements of the performance of common channel signalling network*, International Telecommunication Union, 1992.
- [21] ITU, *Recommendation E.506 : Forecasting international traffic*, International Telecommunication Union, 1992.
- [22] ITU, *Recommendation E.507 : Models for forecasting international traffic*, International Telecommunication Union, 1988.
- [23] ITU, *Recommendation E.508 : Forecasting new telecommunication services*, International Telecommunication Union, 1992.

- 
- [24] International Telecommunication Union (ITU), "ITU-D Study Groups," 2011. [Online]. Available: <https://www.itu.int/net4/ITU-D/CDS/sg/index.asp?lg=1&sp=2018>. [Accessed 2 12 2017].
- [25] ITU-D, *Telecom Network Planning for evolving Network Architectures, Reference Manual*, Geneva: ITU, 2008.
- [26] B. Decocq, E. Didelet, F. Tillerot, R. Clemente, G. Ferraris, R. Girardi, N. Gómez-Roj, J. F. Lobo, A. Daurell-F, T. Almeida and T. Jakab, "EURESCOM Project P709: Planning of Optical Network, Deliverable 3: Optical Network Planning, Volume 1 of 9: Main Report," EURESCOM, 2000.
- [27] O. G. Soto, *Network Planning, Lecture NP-2.2, Role of Network Planning in the current Telecom scenario*, ITU, 2002.
- [28] O. G. Soto, *Integrated Planning Process*, 2005.
- [29] H. Chen, Y. Li and G. Shen, "Planning for Passive Optical Network Deployment with K-means Clustering-based Approach," in *Asia Communications and Photonics Conference*, 2015.
- [30] Oracle Communications, *An Integrated Approach to FTTx Network Lifecycle Management*, Oracle Communications, 2013.
- [31] A. Juttner, T. Cinkler and B. Dezso, "A randomized cost smoothing approach for optical network design," in *2007 9th International Conference on Transparent Optical Networks*, 2007.
- [32] G. Shen and R. S. Tucker, "Capacity Allocation in Optical Networks under Dynamic Lightpath Demands," in *Conference on Optical Fiber communication /National Fiber Optic Engineers Conference, 2008. OFC/NFOEC 2008.*, 2008.
- [33] B. T. Olsen and K. Stordahl, "Models for forecasting cost evolution of components and technologie," *Teletronikk*, vol. 100, no. 4, pp. 138-148, 2004.
- [34] R. Bailey and O. G. Soto, *Business Planning Tools: STEM*, 2006.

- 
- [35] R. Fildes and V. Kumar, "Telecommunications demand forecasting—a review," *International Journal of Forecasting*, vol. 18, no. 4, pp. 489-522, 2002.
- [36] O. G. Soto, *Decision making requirements in planning and solution mapping*, ITU, 2005.
- [37] V. Radojičić and B. Bakmaz, *Primena kvantitativnih metoda prognoziranja u telekomunikacijama*, Saobraćajni fakultet, 2010.
- [38] V. Radojičić, *Prognoziranje u telekomunikacijama*, Saobraćajni fakultet, 2003.
- [39] J. S. Armstrong, *Principles of forecasting: a handbook for researchers and practitioners*, vol. 30, Springer Science & Business Media, 2001.
- [40] S. Veličković and V. Radojičić, "Ključne karakteristike difuzije novih servisa od interesa za donošenje stratejskih odluka," in *21. Conference and exhibition YU INFO 2016, zbornik radova*, Beograd, 2016.
- [41] J. C. Fisher and R. H. Pry, "A simple substitution model of technological change," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 3, no. 1, pp. 75-88, 1971.
- [42] N. Meade and T. Islam, "Technological Forecasting—Model Selection, Model Stability, and Combining Models," *Management Science*, vol. 44, no. 8, pp. 1115-1130, 1998.
- [43] D. Chandrasekaran and G. J. Tellis, "A critical review of marketing research on diffusion of new products," in *Review of marketing research*, Emerald Group Publishing Limited, 2007, pp. 39-80.
- [44] S. Radas, "Diffusion models in marketing: How to incorporate the effect of external influence?," *Privredna kretanja i ekonomska politika*, vol. 15, no. 105, pp. 30-51, 2006.
- [45] E. M. Rogers, *Diffusion of Innovations* (4th edition), Free Press, 1995.
- [46] V. Mahajan, E. Muller and R. K. Srivastava, "Determination of adopter categories by using innovation diffusion models," *Journal of Marketing Research*, pp. 37-50,

1990.

- [47] E. M. Rogers, *Diffusion of Innovations* (3rd edition), Free Press, 1983.
- [48] E. M. Rogers, *Diffusion of Innovations* (5th edition), Free Press, 2003.
- [49] K. E. James, *Developing, Positioning, and Differentiating Products through the Life Cycle*, 2002.
- [50] P. Kotler, *Framework for marketing management*, Prentice Hall, 2002.
- [51] I. Sahin, "Detailed review of Rogers' diffusion of innovations theory and educational technology-related studies based on Rogers' theory," *TOJET: The Turkish Online Journal of Educational Technology*, vol. 5, no. 2, 2006.
- [52] F. M. Bass, "A New Product Growth for Model Consumer Durables," *Management Science*, vol. 15, no. 15, pp. 215-227, 1969.
- [53] G. L. Lilien, A. Rangaswamy and A. De Bruyn, *Principles of Marketing Engineering*, DecisionPro, 2007.
- [54] F. J. Richards, "A flexible growth function for empirical use," *Journal of experimental Botany*, vol. 10, no. 2, pp. 290-301, 1959.
- [55] M. Sokele, "Growth models for the forecasting of new product market adoption," *Elektronikk*, vol. 104, no. 3-4, p. 144, 2008.
- [56] N. Meade and T. Islam, "Modelling and forecasting the diffusion of innovation – A 25-year review," *International Journal of Forecasting*, vol. 22, no. 3, pp. 519-545, 2006.
- [57] E. M. Rogers, *Diffusion of Innovations*, Free Press, 1962.
- [58] V. Mahajan, E. Muller and F. M. Bass, "New Product Diffusion Models in Marketing: A Review and Directions for Research," *Journal of Marketing*, vol. 54, no. 1, pp. 1-26, 1990.
- [59] U. Witt, "'Lock-in' vs. 'critical masses'—industrial change under network externalities," *International Journal of Industrial Organization*, vol. 15, no. 6, pp.

- 753-773, 1997.
- [60] A. Boyle, "Some forecasts of the diffusion of e-assessment using a model," *The Innovation Journal: The Public Sector Innovation Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 1-30, 2010.
- [61] V. Mahajan and Y. Wind, "Innovation Diffusion Models of New Product Acceptance: A Reexamination,," in *Innovation Diffusion Models of New Product Acceptance*, V. Mahajan and Y. Wind, Eds., Cambridge, Massachusetts, Ballinger, 1986, pp. 3-25.
- [62] D. Satoh, "A discrete bass model and its parameter estimation," *Journal of the Operations Research Society of Japan*, vol. 44, no. 1, pp. 1-18, 2001.
- [63] V. Mahajan, C. H. Mason and V. Srinivasan, "An evaluation of estimation procedures for new product diffusion models," in *Innovation Diffusion Models of New Product Acceptance*, V. Mahajan and Y. Wind, Eds., Cambridge, Massachusetts, Ballinger, 1986, pp. 203-232.
- [64] D. C. Schmittlein and V. Mahajan, "Maximum likelihood estimation for an innovation diffusion model of new product acceptance," *Marketing science*, vol. 1, no. 1, pp. 57-78, 1982.
- [65] V. Srinivasan and C. H. Mason, "Nonlinear least squares estimation of new product diffusion models," *Marketing science*, vol. 5, no. 2, pp. 169-178, 1986.
- [66] V. Mahajan and S. Sharma, "A simple algebraic estimation procedure for innovation diffusion models of new product acceptance," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 30, no. 4, pp. 331-345, 1986.
- [67] S. Veličković, "Prognoziranje perioda dostizanja kritične mase korisnika VOIP servisa," in *Zbornik radova INFOTEH 2010*, Jahorina, 2010.
- [68] T. W. Valente, *Network models of the diffusion of innovations.*, Cresskill New Jersey Hampton Press 1995., 1995.
- [69] S. Sundqvist, L. Frank, K. Puumalainen and J. Kamarainen, "Forecasting the



- Critical Mass of Wireless Communications," in *ANZMAC 2002 Conference Proceedings*, 2002.
- [70] Republic of Serbia - Regulatory Agency for Electronic Communications and Postal Services (RATEL), "Overviews of Telecom Market," Republic of Serbia - Regulatory Agency for Electronic Communications and Postal Services (RATEL), 2006. [Online]. Available: [http://www.ratel.rs/market/overviews\\_of\\_telecom\\_market.129.html](http://www.ratel.rs/market/overviews_of_telecom_market.129.html). [Accessed 17 02 2017].
- [71] Republic of Serbia - Regulatory Agency for Electronic Communications and Postal Services (RATEL), "An Overview of Telecom Market in the Republic of Serbia in 2015," Republic of Serbia - Regulatory Agency for Electronic Communications and Postal Services (RATEL), Belgrade,, 2016.
- [72] Republic of Serbia - Regulatory Agency for Electronic Communications and Postal Services (RATEL), "An overview of the telecom market 2016 - Quarterly reports Q1-Q4," Republic of Serbia - Regulatory Agency for Electronic Communications and Postal Services (RATEL), 2016. [Online]. Available: [http://www.ratel.rs/market/quarterly\\_reports.631.html](http://www.ratel.rs/market/quarterly_reports.631.html). [Accessed 20 03 2017].
- [73] S. Mitrović, V. Radojičić, M. Stojanović and G. Marković, "The capacity expansion approach in optical transport networks with fixed and flexible grids," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 127, pp. 310-316, 2017.
- [74] J. D. Hamilton, *Time Series Analysis*. Vol. 2., Princeton: Princeton university press, 1994.
- [75] C. D. Lewis, *International and Business Forecasting Methods*, London: Butterworths, 1982.
- [76] D. C. Montgomery, E. A. Peck and G. G. Vining, *Introduction to Linear Regression Analysis*, Wiley, 2001.
- [77] V. Radojicic, G. Markovic, M. Jankovic and B. Draskovic, "Broadband Traffic Forecasting in the Transport Network," *PROMET - Traffic&Transportation*, vol.

- 24, no. 4, pp. 275-284, 2012.
- [78] K. Stordahl, K. Kalhagen, B. Olsen, J. Lydersen, B. Olufsen and N. Elnegaard, "Traffic Forecast Models for the Transport Network," in *Networks*, Munich, 2002.
- [79] A. Kind, D. Gantenbein and H. Etoh, "Relationship discovery with netflow to enable business-driven it management," in *Business-Driven IT Management, 2006. BDIM'06. The First IEEE/IFIP International Workshop on*, 2006.
- [80] P. P. Marino, *Optimization of Computer Networks: Modeling and Algorithms: a Hands-on Approach*, John Wiley & Sons, 2016.
- [81] I. D. Moscholios, V. G. Vassilakis, M. D. Logothetis and J. S. Vardakas, "Bandwidth reservation in the Erlang multirate loss model for elastic and adaptive traffic," in *Proc. of 9th Advanced Int. Conf. on Telecommunications, AICT*, 2013.
- [82] A. Elwalid and D. Mitro, "Design of generalized processor sharing schedulers which statistically multiplex heterogeneous QoS classes," in *IEEE INFOCOM '99. Eighteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings.*, 1999.
- [83] D. Nandita, J. Kuri and H. S. Jamadagni, "Optimal call admission control in generalized processor sharing (GPS) schedulers," in *INFOCOM 2001. Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, 2001.
- [84] ITU, *Recommendation Y.1291 : An architectural framework for support of Quality of Service in packet networks*, International Telecommunication Union, 2004.
- [85] H. Takagi and L. Kleinrock, "Throughput analysis for persistent CSMA systems," *IEEE transactions on communications*, vol. 33, no. 7, pp. 627-638, 1985.
- [86] J. Kaufman, "Blocking in a shared resource environment," *IEEE Transactions on communications*, vol. 29, no. 10, pp. 1474-1481, 1981.
- [87] J. Roberts, "An Erlang formula for the Internet," in *The First European Teletraffic*

*Seminar (invited talks), Poznan, 2011.*

- [88] A. Girard, *Routing and dimensioning in circuit-switched networks*, Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1990.
- [89] K. W. Ross, *Multiservice loss models for broadband telecommunication networks*, Springer Science & Business Media, 2012.
- [90] P. Pavon-Marino and J.-L. Izquierdo-Zaragoza, "Net2plan: an open source network planning tool for bridging the gap between academia and industry," *IEEE Network*, vol. 29, no. 5, pp. 90-96, 2015.
- [91] S. Mitrović, V. Radojičić and M. Bakmaz, "Modifikacija funkcije troškova zagušenja kod metaheurističkog pristupa u rešavanju problema proširenja mrežnih kapaciteta," in *Trideset treći simpozijum o novim tehnologijama u postanskom i telekomunikacionom saobraćaju PosTel 2015 - Zbornik radova*, Vojvode Stepe 305, Beograd, Srbija, 2015.
- [92] Y. Zhao, S. Wang, S. Xu, X. Wang, X. Gao and C. Qiao, "Load balance vs energy efficiency in traffic engineering: A game theoretical perspective," in *INFOCOM, 2013 Proceedings IEEE*, 2013.
- [93] B. Fortz and M. Thorup, "Internet traffic engineering by optimizing OSPF weights," in *INFOCOM 2000. Nineteenth annual joint conference of the IEEE computer and communications societies. Proceedings. IEEE*, 2000.
- [94] M. Ericsson, M. G. C. Resende and P. M. Pardalos, "A genetic algorithm for the weight setting problem in OSPF routing," *Journal of combinatorial optimization*, vol. 6, no. 3, pp. 299-333, 2002.
- [95] A. Girard, B. Sansó and F. Vazquez-Abad, *Performance evaluation and planning methods for the next generation internet*, vol. 6, Springer Science & Business Media, 2006.
- [96] S. Mitrović, V. Radojičić and G. Marković, "Analiza plana proširenja kapaciteta optičkog linka u funkciji troškova opreme," in *PosTel 2014 - XXXII simpozijum o novim tehnologijama u Poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju*, Beograd,

2014.

- [97] S. Mitrović, V. Radojičić and G. Marković, "Strategije za proširenje resursa mreže u funkciji modela tražnje," in *XXXI Simpozijum o novi tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju*, Beograd, 2013.
- [98] O. M. Heckmann, *The Competitive Internet Service Provider: Network Architecture, Interconnection, Traffic Engineering and Network Design*, John Wiley & Sons, Ltd, 2007.
- [99] X. Yu, M. Tornatore, M. Xia, J. Wang, J. Zhang, Y. Zhao, J. Zhang and B. Mukherjee, "Migration from fixed grid to flexible grid in optical networks," vol. 53, no. 2, pp. 34-43, 2015.
- [100] T. Bonald and J. W. Roberts, "Internet and the Erlang formula," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 42, no. 1, pp. 23-30, 2012.
- [101] P. P. Mariño, "Net2Plan User's Guide, Version 0.3.1," 23 11 2015. [Online]. Available: <http://www.net2plan.com/help/index.html#biblio-11>. [Accessed 16 01 2017].
- [102] Internet Engineering Task Force (IETF), *Request for Comments 7011: Specification of the IP Flow Information Export (IPFIX) Protocol for the Exchange of Flow Information*, Internet Engineering Task Force, 2013.
- [103] B. Li, J. Springer, G. Bebis and M. H. Gunes, "A survey of network flow applications," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 36, no. 2, pp. 567-581, 2013.
- [104] C. So-In, "A survey of network traffic monitoring and analysis tools," *Cse 576m computer system analysis project*, Washington University in St. Louis, 2009.
- [105] I. Ivanović, "AMRES BPD 104 - Preporuke za analizu mrežnog saobraćaja pomoću NetFlow protokola - Dokument najbolje prakse (smernice i preporuke)," 2011.
- [106] J.-L. Debieesse and G. Matignon, "Comparison of different methods for the

- calculation of traffic matrices," *Annales des Telecommunications*, vol. 35, no. 3, pp. 91-102, Mar 1980.
- [107] N. W. Macfadyen, "Traffic Characterisation and Modelling," *BT Technology Journal*, vol. 20, no. 3, pp. 14-30, Jul 2002.
- [108] M. Blanuša and P. Matavulj, "Tehno - ekonomski aspekti planiranja i razvoja optičkih veza," *Telekomunikacije*, 2012.
- [109] W. A. Shewhart and W. E. Deming, *Statistical method from the viewpoint of quality control*, Courier Corporation, 1939.
- [110] W. E. Deming, "Out of Crisis, Centre for Advanced Engineering Study," *Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA*, 1986.
- [111] K. Ishikawa, *Introduction to quality control*, Productivity Press, 1990.
- [112] L. Budry, N. Kristian, I. Fekete, A. Gyürke, R. Kónkoly, S. Majorana, R. Sabatino, L. Aarthun, D. Myhre, S. Deroukakis, I. Iordanidis, D. Katsianis, A. Ruiz-Cantera and D. Tacchino, "EURESCOM Project P901PF: Extended investment analysis of telecommunication operator strategies, Volume 1 of 2: Main Report," EURESCOM, 1999.
- [113] Object Management Group - Business Process Management Initiative, "Object Management Group - Business Process Management Initiative," [Online]. Available: <http://www.bpmn.org/>. [Accessed 15 06 2017].
- [114] Workflow Management Coalition, "Workflow Management Coalition, XPDL Support and Resources," [Online]. Available: <http://www.wfmc.org/xpdl.html>. [Accessed 16 06 2017].
- [115] R. S. Kaplan and S. R. Anderson, *Time-driven activity-based costing: a simpler and more powerful path to higher profits*, Harvard business press, 2007.
- [116] M. B. Kelly, "Report: The telemanagement forum's enhanced telecom operations map (etom)," *Journal of Network and Systems Management*, vol. 11, no. 1, pp. 109-119, 2003.

- [117] ITU, *Recommendation M.3050 : Enhanced Telecom Operations Map (eTOM)*, International Telecommunication Union, 2007.
- [118] T. P. Wright, "Factors affecting the cost of airplanes," *Journal of the aeronautical sciences*, vol. 3, no. 4, pp. 122-128, 1936.
- [119] P.-F. Verhulst, "Notice sur la loi que la population suit dans son accroissement. correspondance mathematique et physique publiee par a," *Quetelet*, vol. 10, pp. 113-121, 1838.
- [120] eAccu-Tech, "eAccu-Tech," [Online]. Available: <http://www.eaccu-tech.com/>. [Accessed 3 11 2017].
- [121] E. Mansfield, *Managerial economics: Theory, applications, and cases*, WW Norton, 1999.
- [122] G. Friend and S. Zehle, "Guide to business planning. London: Economist in association with Profile Books, 2004".
- [123] *Commission of the European Communities, "COMMISSION DECISION of 11.XII.2007 ON THE STATE AID case C 53/2006 (ex N 262/2005, ex CP 127/2004), Investment by the city of Amsterdam in a fibre-to-the home (FttH) network", Brussels, December 11, 2007, 2007.*
- [124] The Belgacom S.A., "The Belgacom S.A. cost accounting system, General Description, Financial year 2007," Belgacom, 2008.
- [125] J. C. Kelleher and J. J. MacCormack, "Internal Rate of Return: A Cautionary Tale," *McKinsey Quarterly*, 2004.
- [126] H. Kierulff, "MIRR: A better measure," *Business Horizons*, vol. 51, no. 4, pp. 321-329, 2008.
- [127] M. E. Porter, *Competitive advantage: creating and sustaining superior performance. 1985*, New York: Free Press, 1985.
- [128] S. Tarantola, "Global Sensitivity Analysis of complex models," in *Joint Research*

*Centre of the European Commission, Seminar Series, 2008.*

- [129] T. E. Copeland and P. T. Keenan, "How much is flexibility worth?," *The McKinsey Quarterly*, no. 2, pp. 38-50, 1998.
- [130] M. Riis and K. A. Andersen, "Multiperiod capacity expansion of a telecommunications connection with uncertain demand," *Computers & Operations Research*, vol. 31, no. 9, pp. 1427-1436, 2004.
- [131] A. M. Odlyzko, "Internet traffic growth: Sources and implications," in *ITCom 2003*, 2003.
- [132] M. Ruiz, L. Velasco, A. Lord, D. Fonseca, M. Pioro, R. Wessaly and J. P. Fernandez-Palacios, "Planning fixed to flexgrid gradual migration: drivers and open issues," vol. 52, no. 1, pp. 70-76.
- [133] International Telecommunications Union (ITU), "ITU-T Recommendation G.692 - Transmission media characteristics - Optical interfaces for multichannel systems with optical amplifiers," International Telecommunication Union, 1998.
- [134] G. Shen, H. Guo and S. K. Bose, "Survivable elastic optical networks: survey and perspective (invited)," *Photonic Network Communications*, vol. 31, no. 1, pp. 71-87, 2016.
- [135] V. López, Ñ. G. De Dios, O. Gerstel, N. Amaya, G. Zervas, D. Simeonidou and J. P. Fernandez-Palacios, "Target cost for sliceable bandwidth variable transponders in a real core network," in *Future Network and Mobile Summit, 2013*, 2013.
- [136] A. Napoli, M. Bohn, D. Rafique, A. Stavdas, N. Sambo, L. Potì, M. Noelle, J. K. Fischer, E. Riccardi and A. Pagano, "Next generation elastic optical networks: The vision of the European research project IDEALIST," *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 2, pp. 152-162, 2015.
- [137] I. Tomkos, S. Azodolmolky, J. Sole-Pareta, D. Careglio and E. Palkopoulou, "A tutorial on the flexible optical networking paradigm: State of the art, trends, and research challenges," *Proceedings of the IEEE*, vol. 102, no. 9, pp. 1317-1337,

Sept 2014.

- [138] M. Jinno, H. Takara, B. Kozicki, Y. Tsukishima, Y. Sone and S. Matsuoka, "Spectrum-efficient and scalable elastic optical path network: architecture, benefits, and enabling technologies," *IEEE communications magazine*, vol. 47, no. 11, 2009.
- [139] S. L. Woodward, "ROADM options in optical networks: flexible grid or not?," in *Optical Fiber Communication Conference*, 2013.
- [140] P. Papanikolaou, P. Soumplis, K. Manousakis, G. Papadimitriou, G. Ellinas, K. Christodoulopoulos and E. Varvarigos, "Minimizing energy and cost in fixed-grid and flex-grid networks," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 7, no. 4, pp. 337-351, 2015.
- [141] A. Ahmad, A. Bianco, E. Bonetto, M. Garrich and J. R. F. Oliveira, "Switching node architectures in flexible-grid networks: A performance comparison," in *International Conference on Optical Network Design and Modeling, 2014*, 2014.
- [142] M. Pickavet and P. Demeester, "Long-Term Planning of WDM Networks: A Comparison between Single-Period and Multi-Period Techniques," *Photonic Network Communication*, vol. 1, no. 4, pp. 331-346, Dec 1999.
- [143] B. Melián, M. Laguna and J. A. Moreno-Pérez, "Capacity expansion of fiber optic networks with WDM systems: problem formulation and comparative analysis," *Computers & Operations Research*, vol. 31, no. 3, pp. 461-472, 2004.
- [144] P. Papanikolaou, K. Christodoulopoulos and E. Varvarigos, "Multilayer flex-grid network planning," in *International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM), 2015*, Pisa, 2015.
- [145] S. Shakya, X. Cao, Z. Ye and C. Qiao, "Spectrum allocation in spectrum-sliced elastic optical path networks using traffic prediction," *Photonic Network Communications*, vol. 30, no. 1, pp. 131-142, 2015.
- [146] C. Meusburger and D. A. Schupke, "Optimizing the migration of channels with higher Bit-rates," in *Optical Fiber Communication-includes post deadline papers*,



2009. *OFC 2009.*, 2009.

- [147] M. Tahon, S. Verbrugge, D. Colle, M. Pickavet, P. Demeester, P. Wright and A. Lord, "Valuing flexibility in the migration to flexible-grid networks [invited]," *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 5, no. 10, pp. A184--A191, 2013.

## PRILOZI

### Prilog 1

**Tabela 1.** ITU Standardi: QoS - IP multimedijalni podsistemi

R.b.	Oznaka	Naziv
1	ITU-T Rec. Q.3630	Inter-IMS network to network interface - Protocol specification
2	ITU-T Rec. Q.4001.3	IMS specific use of session initiation protocol and session description protocol; Conformance testing - Part 3: Network side; Abstract test suite and protocol implementation extra information for testing
3	ITU-T Rec. Q.3932.4	IMS/NGN performance benchmark - Part 4: Testing of the performance design objectives
4	ITU-T Rec. Q.3610	The signalling requirements and protocol profiles for CRBT services
5	ITU-T Rec. Q.3053	Signalling architecture and requirements for IP-based short message service over ITU-T defined NGN
6	ITU-T Rec. Q.4006.3	Communication waiting service using IP multimedia core network subsystem; Conformance testing - Part 3: User side; Test suite structure and test purposes
7	ITU-T Rec. J.366.2	IPCablecom2 IP Multimedia Subsystem (IMS): Session handling – IM call model – Stage 2 specification

**Tabela 2.** SNMP protokol – Pregled IETF standarda

<b>R.b.</b>	<b>Oznaka</b>	<b>Naziv</b>
1	RFC 1155	Structure and Identification of Management Information for TCP/IP-based Internets
2	RFC 1157	Simple Network Management Protocol
3	RFC 1212	Concise MIB Definitions
4	RFC 1213	Management Information Base for Network Management of TCP/IP-based internets: MIB-II
5	RFC 1215	Convention for defining traps for use with the SNMP
6	RFC 1493	Definitions of Managed Objects for Bridges. Packeteer supports only dot1Bridge (dot1dBase, dot1dTp)
7	RFC 1901	Introduction to Community-based SNMPv2
8	RFC 1902	Structure of Management Information for Version 2 of the Simple Network Management Protocol (SNMPv2)
9	RFC 1903	Textual Conventions for Version 2 of the Simple Network Management Protocol (SNMPv2)
10	RFC 1904	Conformance Statements for Version 2 of the Simple Network Management Protocol (SNMPv2)
11	RFC 1905	Protocol Operations for Version 2 of the Simple Network Management Protocol (SNMPv2)
12	RFC 1907	Management Information Base for Version 2 of the Simple Network Management Protocol (SNMPv2)
13	RFC 1908	Coexistence between Version 1 and Version 2 of the Internet-standard Network Management Framework
14	RFC 2011	SNMPv2 Management Information Base for the Internet Protocol using SMIV2
15	RFC 2012	SNMPv2 Management Information Base for the Transmission Control Protocol using SMIV2
16	RFC 2013	SNMPv2 Management Information Base for the User Datagram Protocol using SMIV2
17	RFC 2574	User-based Security Model (USM) for version 3 of the Simple Network Management Protocol (SNMPv3)
18	RFC 2578	Structure of Management Information Version 2 (SMIV2)

<b>R.b.</b>	<b>Oznaka</b>	<b>Naziv</b>
19	RFC 2579	Textual Conventions for SMIV2
20	RFC 2580	Conformance Statements for SMIV2
21	RFC 3410	Introduction and Applicability Statements for Internet Standard Management Framework
22	RFC 3411	An Architecture for Describing SNMP Management Frameworks
23	RFC 3412	Message Processing and Dispatching for the Simple Network Management Protocol (SNMP)
24	RFC 3413	SNMPv3 Applications
25	RFC 3414	User-based Security Model (USM) for version 3 of the Simple Network Management Protocol (SNMPv3)
26	RFC 3415	View-based Access Control Model (VACM) for the Simple Network Management Protocol (SNMP)
27	RFC 3416	Version 2 of the Protocol Operations for the Simple Network Management Protocol (SNMP)
28	RFC 3417	Transport Mappings for the Simple Network Management Protocol (SNMP)
29	RFC 3418	Management Information Base (MIB) for the Simple Network Management Protocol (SNMP). This document obsoletes definitions in RFC documents 1907.
30	RFC 3584	Coexistence between Version 1, Version 2, and Version 3 of the Internet-standard Network Management Framework
31	RFC 3826	The Advanced Encryption Standard (AES) Cipher Algorithm in the SNMP User-based Security Model
32	RFC 5343	Simple Network Management Protocol (SNMP) Context EngineID Discovery
33	Section 10 of RFC2026 (draft)	Extension to the User-Based Security Model (USM) to Support Triple-DES EDE in "Outside" CBC Mode – update

## Prilog 2

**Tabela 1.** Preporučene vrednosti za parametar  $K$  za različite tipove mrežnih komponenta [33]

Klasa proizvoda	$K$ (%)
CivilWorks	100,00
CopperCable	100,00
Electronics	80,00
SitesAndEnclosures	100,00
FibreCable	90,00
Installation (constant)	100,00
AdvancedOpticalComponents	70,00
Installation (decreasing)	85,00
OpticalComponents	80,00

**Tabela 2.** Preporučene vrednosti za parametre  $Q_0$  i  $\Delta t$ , u slučaju kada nema statističkih

Klasa penetracije proizvoda	$Q_0$	$\Delta t$	Klasa penetracije proizvoda	$Q_0$	$\Delta t$
Emerging_Fast	0.001	5	New_Fast	0.01	5
Emerging_Medium	0.001	10	New_Medium	0.01	10
Emerging_Slow	0.001	20	New_Slow	0.01	20
Emerging_VerySlow	0.001	40	New_VerySlow	0.01	40
Mature_Fast	0.1	5	Old_Fast	0.5	5
Mature_Medium	0.1	10	Old_Medium	0.5	10
Mature_Slow	0.1	20	Old_Slow	0.5	20
Mature_VerySlow	0.1	40	Old_VerySlow	0.5	40
			Straight Line	0.1	1000

**Tabela 3.** Godišnji trend pada cene cena fiksnog grid multipleksera (po jednoj talasnoj dužini), kao i fleksibilne grid opreme na nivou čvora, primenom metode „Krive logističkog rasta“, prema usvojenim parametrima  $K$ ,  $Q_0$  i  $\Delta t$

Fiksna grid oprema			Fleksibilna grid oprema		
$Q_0$	$\Delta t$	$K$	$Q_0$	$\Delta t$	$K$
0.5	10	0.8	0.01	10	0.8
Godina	Period $t$	Usvojena cena*	Godina	Period $t$	Usvojena cena*
2010	0	7000			
2011	1	6572.436			
2012	2	6262.458			
2013	3	6044.199	2013	0	386000
2014	4	5894.252	2014	1	335673.6
2015	5	5793.202	2015	2	292188.7
2016	6	5726.066	2016	3	254709
2017	7	5681.909	2017	4	222527.4
2018	8	5653.068	2018	5	195051.8
2019	9	5634.317	2019	6	171789.4
2020	10	5622.164	2020	7	152329.7

\* Usvojena cena  $t$  važi za datum 31. decembar

**Tabela 4.** Trend mesečnog pada cene cena fiksnog grid multipleksera (po jednoj talasnoj dužini) i fleksibilne grid opreme na nivou čvora, primenom metode „Krive logističkog rasta“ i linearne interpolacije

Vremenski slot (mesec godina)	Cena fiksnog grid multipleksera po jednoj talasnoj dužini	Cena opreme tehnologije fleksibilnog grida	Vremenski slot (mesec godina)	Cena fiksnog grid multipleksera po jednoj talasnoj dužini	Cena opreme tehnologije fleksibilnog grida
31.12.2010	7000.00		31.12.2015	5793.20	292188.72
31.01.2011	6964.37		31.01.2016	5787.61	289065.41
28.02.2011	6928.74		29.02.2016	5782.01	285942.10
31.03.2011	6893.11		31.03.2016	5776.42	282818.79
30.04.2011	6857.48		30.04.2016	5770.82	279695.48
31.05.2011	6821.85		31.05.2016	5765.23	276572.17
30.06.2011	6786.22		30.06.2016	5759.63	273448.86
31.07.2011	6750.59		31.07.2016	5754.04	270325.55
31.08.2011	6714.96		31.08.2016	5748.44	267202.24
30.09.2011	6679.33		30.09.2016	5742.85	264078.93
31.10.2011	6643.70		31.10.2016	5737.25	260955.62
30.11.2011	6608.07		30.11.2016	5731.66	257832.31
31.12.2011	6572.44		31.12.2016	5726.07	254709.00
31.01.2012	6546.60		31.01.2017	5722.39	252027.21
29.02.2012	6520.77		28.02.2017	5718.71	249345.41
31.03.2012	6494.94		31.03.2017	5715.03	246663.61
30.04.2012	6469.11		30.04.2017	5711.35	243981.82
31.05.2012	6443.28		31.05.2017	5707.67	241300.02
30.06.2012	6417.45		30.06.2017	5703.99	238618.23
31.07.2012	6391.62		31.07.2017	5700.31	235936.43
31.08.2012	6365.78		31.08.2017	5696.63	233254.63
30.09.2012	6339.95		30.09.2017	5692.95	230572.84
31.10.2012	6314.12		31.10.2017	5689.27	227891.04
30.11.2012	6288.29		30.11.2017	5685.59	225209.25
31.12.2012	6262.46		31.12.2017	5681.91	222527.45
31.01.2013	6244.27		31.01.2018	5679.51	220237.81
28.02.2013	6226.08		28.02.2018	5677.10	217948.17
31.03.2013	6207.89		31.03.2018	5674.70	215658.53

Vremenski slot (mesec godina)	Cena fiksnog grid multipleksera po jednoj talasnoj dužini	Cena opreme tehnologije fleksibilnog grida	Vremenski slot (mesec godina)	Cena fiksnog grid multipleksera po jednoj talasnoj dužini	Cena opreme tehnologije fleksibilnog grida
30.04.2013	6189.71		30.04.2018	5672.30	213368.89
31.05.2013	6171.52		31.05.2018	5669.89	211079.25
30.06.2013	6153.33		30.06.2018	5667.49	208789.61
31.07.2013	6135.14		31.07.2018	5665.09	206499.96
31.08.2013	6116.95		31.08.2018	5662.68	204210.32
30.09.2013	6098.76		30.09.2018	5660.28	201920.68
31.10.2013	6080.58		31.10.2018	5657.87	199631.04
30.11.2013	6062.39		30.11.2018	5655.47	197341.40
31.12.2013	6044.20	386000.00	31.12.2018	5653.07	195051.76
31.01.2014	6031.70	381806.14	31.01.2019	5651.51	193113.23
28.02.2014	6019.21	377612.27	28.02.2019	5649.94	191174.71
31.03.2014	6006.71	373418.41	31.03.2019	5648.38	189236.18
30.04.2014	5994.22	369224.55	30.04.2019	5646.82	187297.65
31.05.2014	5981.72	365030.68	31.05.2019	5645.26	185359.13
30.06.2014	5969.23	360836.82	30.06.2019	5643.69	183420.60
31.07.2014	5956.73	356642.95	31.07.2019	5642.13	181482.07
31.08.2014	5944.23	352449.09	31.08.2019	5640.57	179543.55
30.09.2014	5931.74	348255.23	30.09.2019	5639.00	177605.02
31.10.2014	5919.24	344061.36	31.10.2019	5637.44	175666.49
30.11.2014	5906.75	339867.50	30.11.2019	5635.88	173727.97
31.12.2014	5894.25	335673.64	31.12.2019	5701.80	171789.44
31.01.2015	5885.83	332049.89	31.01.2020	5767.72	170167.79
28.02.2015	5877.41	328426.15	29.02.2020	5833.63	168546.15
31.03.2015	5868.99	324802.41	31.03.2020	5899.55	166924.51
30.04.2015	5860.57	321178.66	30.04.2020	5965.47	165302.86
31.05.2015	5852.15	317554.92	31.05.2020	6031.39	163681.22
30.06.2015	5843.73	313931.18	30.06.2020	6097.30	162059.57
31.07.2015	5835.31	310307.43	31.07.2020	6163.22	160437.93
31.08.2015	5826.89	306683.69	31.08.2020	6229.14	158816.29
30.09.2015	5818.46	303059.95	30.09.2020	6295.06	157194.64
31.10.2015	5810.04	299436.20	31.10.2020	6360.98	155573.00
30.11.2015	5801.62	295812.46	30.11.2020	6426.89	153951.35
			31.12.2020	6492.81	152329.71



### Prilog 3

**Tabela 1.** Plan proširenja čvora br. 5, primenom Strategije serijskog proširenja modularnih kapaciteta mrežnog linka sa funkcijom troškova zagušenja i opcijom prelaska na novu tehnologiju

$t$	vremenski slot	$y(t)$ (Gb/s)	broj kanala	iskorišćenje/zagušenje	broj kanala	iskorišćenje/zagušenje	broj kanala	iskorišćenje/zagušenje	
			n	U(t)period 1					
0	31.12.2010	2.81165	1	0.070291					
1	31.01.2011	3.097377	1	0.077434					
2	28.02.2011	3.383104	1	0.084578	n	U(t)period 2			
3	31.03.2011	3.668831	1	0.091721	1	0.091721			
4	30.04.2011	3.954558	1	0.098864	1	0.098864			
5	31.05.2011	4.240285	1	0.106007	1	0.106007	n	U(t)period 3	
6	30.06.2011	4.526012			1	0.11315	1	0.11315	
7	31.07.2011	4.811739			1	0.120293	1	0.120293	
8	31.08.2011	5.097466	n	U(t)period 4		1	0.127437	1	0.127437
9	30.09.2011	5.383193	1	0.13458			1	0.13458	
10	31.10.2011	5.66892	1	0.141723			1	0.141723	
11	30.11.2011	5.954647	1	0.148866	n	U(t)period 5		1	0.148866
12	31.12.2011	6.240374	1	0.156009	1	0.156009			
13	31.01.2012	7.107551	1	0.177689	1	0.177689			
14	29.02.2012	7.974729	1	0.199368	1	0.199368	n	U(t)period 6	
15	31.03.2012	8.841906			1	0.221048	1	0.221048	
16	30.04.2012	9.709083			1	0.242727	1	0.242727	
17	31.05.2012	10.57626	n	U(t)period 7		1	0.264407	1	0.264407
18	30.06.2012	11.44344	1	0.286086			1	0.286086	
19	31.07.2012	12.31061	1	0.307765			1	0.307765	
20	31.08.2012	13.17779	1	0.329445	n	U(t)period 8		1	0.329445
21	30.09.2012	14.04497	1	0.351124	1	0.351124			
22	31.10.2012	14.91215	1	0.372804	1	0.372804			
23	30.11.2012	15.77932	1	0.394483	1	0.394483	n	U(t)period 9	
24	31.12.2012	16.6465			1	0.416163	1	0.416163	

$t$	vremenski slot	$y(t)$ (Gb/s)	broj kanala	iskorišćenje/zagušenje	broj kanala	iskorišćenje/zagušenje	broj kanala	iskorišćenje/zagušenje
25	31.01.2013	18.71554			1	0.467888	1	0.467888
26	28.02.2013	20.78457	n	U(t)period 10	1	0.519614	1	0.519614
27	31.03.2013	22.85361	1	0.57134			1	0.57134
28	30.04.2013	24.92265	1	0.623066			1	0.623066
29	31.05.2013	26.99168	1	0.674792	n	U(t)period 11	1	0.674792
30	30.06.2013	29.06072	1	0.726518	1	0.726518		
31	31.07.2013	31.12975	1	0.778244	1	0.778244		
32	31.08.2013	33.19879	1	0.82997	1	0.82997	n	U(t)period 12
33	30.09.2013	35.26783			1	0.881696	1	0.881696
34	31.10.2013	37.33686			<b>1</b>	<b>0.933422</b>	2	0.466711
35	30.11.2013	39.4059	n	U(t)period 13	1	0.985147	2	0.492574
36	31.12.2013	41.47494	2	0.518437			2	0.518437
37	31.01.2014	45.25503	2	0.565688			2	0.565688
38	28.02.2014	49.03512	2	0.612939	n	U(t)period 14	2	0.612939
39	31.03.2014	52.81521	2	0.66019	2	0.66019		
40	30.04.2014	56.59529	2	0.707441	2	0.707441		
41	31.05.2014	60.37538	2	0.754692	2	0.754692	n	U(t)period 15
42	30.06.2014	64.15547			2	0.801943	2	0.801943
43	31.07.2014	67.93556			2	0.849195	2	0.849195
44	31.08.2014	71.71565	n	U(t)period 16	2	0.896446	2	0.896446
45	30.09.2014	75.49574	3	0.629131			<b>2</b>	<b>0.943697</b>
46	31.10.2014	79.27583	3	0.660632			2	0.990948
47	30.11.2014	83.05592	3	0.692133	n	U(t)period 17	2	1.038199
48	31.12.2014	86.83601	3	0.723633	3	0.723633		
49	31.01.2015	92.81528	3	0.773461	3	0.773461		
50	28.02.2015	98.79455	3	0.823288	3	0.823288	n	U(t)period 18
51	31.03.2015	104.7738			3	0.873115	3	0.873115
52	30.04.2015	110.7531			<b>3</b>	<b>0.922942</b>	4	0.692207
53	31.05.2015	116.7324	n	U(t)period 19	3	0.97277	4	0.729577
54	30.06.2015	122.7116	4	0.766948			4	0.766948
55	31.07.2015	128.6909	4	0.804318			4	0.804318
56	31.08.2015	134.6702	4	0.841689	n	U(t)period 20	4	0.841689

$t$	vremenski slot	$y(t)$ (Gb/s)	broj kanala	iskorišćenje/zagušenje	broj kanala	iskorišćenje/zagušenje	broj kanala	iskorišćenje/zagušenje
57	30.09.2015	140.6494	4	0.879059	4	0.879059		
58	31.10.2015	146.6287	<b>4</b>	<b>0.916429</b>	5	0.733144		
59	30.11.2015	152.608	4	0.9538	5	0.76304	n	U(t)period 21
60	31.12.2015	158.5872			5	0.792936	5	0.792936
61	31.01.2016	168.2799			5	0.8414	5	0.8414
62	29.02.2016	177.9726	n	U(t)period 22	5	0.889863	5	0.889863
63	31.03.2016	187.6653	6	0.781939			<b>5</b>	<b>0.938327</b>
64	30.04.2016	197.358	6	0.822325			5	0.98679
65	31.05.2016	207.0507	6	0.862711	n	U(t)period 23	5	1.035253
66	30.06.2016	216.7434	6	0.903097	6	0.903097		
67	31.07.2016	226.4361	<b>6</b>	<b>0.943484</b>	7	0.8087		
68	31.08.2016	236.1288	6	0.98387	7	0.843317	n	U(t)period 24
69	30.09.2016	245.8214			7	0.877934	7	0.877934
70	31.10.2016	255.5141			<b>7</b>	<b>0.91255</b>	8	0.798482
71	30.11.2016	265.2068	n	U(t)period 25	7	0.947167	8	0.828771
72	31.12.2016	274.8995	8	0.859061			8	0.859061
73	31.01.2017	288.1265	8	0.900395			8	0.900395
74	28.02.2017	301.3535	9	0.837093	n	U(t)period 26	<b>9</b>	<b>0.837093</b>
75	31.03.2017	314.5806	9	0.873835	9	0.873835		
76	30.04.2017	327.8076	<b>9</b>	<b>0.910577</b>	10	0.819519		
77	31.05.2017	341.0346	9	0.947318	10	0.852587	n	U(t)period 27
78	30.06.2017	354.2616			10	0.885654	10	0.885654
79	31.07.2017	367.4886			<b>10</b>	<b>0.918722</b>	11	0.835201
80	31.08.2017	380.7157	n	U(t)period 28	10	0.951789	11	0.865263
81	30.09.2017	393.9427	11	0.895324			11	0.895324
82	31.10.2017	407.1697	12	0.84827			<b>11</b>	<b>0.925386</b>
83	30.11.2017	420.3967	12	0.875827	n	U(t)period 29	11	0.955447
84	31.12.2017	433.6237	12	0.903383	12	0.903383		
85	31.01.2018	451.6129	<b>12</b>	<b>0.94086</b>	13	0.868486		
86	28.02.2018	469.602	12	0.978338	13	0.903081	n	U(t)period 30
87	31.03.2018	487.5912			<b>13</b>	<b>0.937675</b>	14	0.870699
88	30.04.2018	505.5803			13	0.97227	14	0.902822

$t$	vremenski slot	$y(t)$ (Gb/s)	broj kanala	iskorišćenje/zagušenje	broj kanala	iskorišćenje/zagušenje	broj kanala	iskorišćenje/zagušenje
89	31.05.2018	523.5695	n	U(t)period 31	13	1.006864	14	0.934945
90	30.06.2018	541.5586	15	0.902598			<b>14</b>	<b>0.967069</b>
91	31.07.2018	559.5477	<b>15</b>	<b>0.93258</b>			14	0.999192
92	31.08.2018	577.5369	15	0.962561	n	U(t)period 32	14	1.031316
<b>93</b>	<b>30.09.2018</b>	<b>595.526</b>	<b>15</b>	<b>0.992543</b>	<b>16</b>	<b>0.930509</b>		
94	31.10.2018	613.5152	15	1.022525	16	0.958617		
95	30.11.2018	631.5043	15	1.052507	16	0.986725		

## BIOGRAFIJA AUTORA

Mr Slobodan Mitrović, dipl. inž. rođen je 23.11.1972. godine u Valjevu, gde je završio osnovnu školu i gimnaziju (matematičko-programerski smer). Saobraćajni fakultet je upisao školske 1991/92. godine, gde je i diplomirao sa prosečnom ocenom 7.80 (sedam i 80/100). Diplomski rad, pod nazivom “Prilog automatskoj dodeli kanala pri planiranju nove radio-relejne veze”, odbranio je sa ocenom 10 (deset), pod mentorstvom Prof. dr Vladanke Aćimović-Raspopović.

U računarskom centru Saobraćajnog fakulteta zaposlio se 2002. godine, gde je angažovan na poziciji inženjera za komunikacionu podršku, na poslovima razvoja i implementacije novih tehnologija i servisa, nadzora i održavanja računarske mreže i servera, nabavke i održavanja kompletne računarske opreme i uređaja i dr.

Školske 2002/2003. godine upisao je poslediplomske studije na smeru za Poštanski i telekomunikacioni saobraćaj na Saobraćajnom Fakultetu Univerziteta u Beogradu. Krajem 2010. godine položio je sve ispite sa prosečnom ocenom 10.00 (deset i 10/100). Magistarski rad, pod nazivom „Lokalne računarske mreže: koncept, servisi i zaštita”, odbranio je 30. novembra 2010. godine, pod mentorstvom Prof. dr Vladanke Aćimović-Raspopović.

U periodu od 2004. do 2006. godine stekao je CCNA sertifikat u regionalnoj *Cisco* akademiji u Beogradu. Takođe, kandidat je pohađao više *Microsoft*-ovih kurseva vezanih za bezbednost računarskih mreža i servisa. Aktivno se služi engleskim jezikom.

Kandidat je autor jednog rada objavljenog u vrhunskom međunarodnom časopisu, koautor 3 poglavlja u međunarodnim monografijama, koautor jednog rada u vodećem časopisu nacionalnog značaja, kao i autor/koautor 30 radova objavljenih na međunarodnim i domaćim naučnim skupovima. Učestvuje ili je učestvovao kao član projektnog tima na dva međunarodna i pet domaćih naučno-istraživačkih projekata, u okviru kojih je razvio veći broj informatičkih rešenja za rešavanje različitih klasa problema. Na poslovima u računarskom centru posebno je zaslužan za razvoj i implementaciju većine novih fakultetskih mrežnih, *web* i *e-learning* servisa, kao i softvera za anti-spam zaštitu. Višegodišnji je član Radne grupe za implementaciju klijenata za veb servise Univerziteta u Beogradu, kao i Komisije za organizaciju upisa na osnovne akademske studije na Saobraćajnom fakultetu u Beogradu.

## Изјава о ауторству

Име и презиме аутора

**Слободан Митровић**

Број индекса

### Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом:

**Нови модел за утврђивање стратегија за проширење мрежних капацитета**

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

У Београду, \_\_\_\_\_

**Потпис аутора**

**Изјава о истоветности штампане и електронске верзије  
докторског рада**

Име и презиме аутора	<b>Слободан Митровић</b>
Број индекса	_____
Студијски програм	_____
Наслов рада	<b>Нови модел за утврђивање стратегија за проширење мрежних капацитета</b>
Ментор	<b>Проф. др Валентина Радојичић</b>

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањена у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

У Београду, \_\_\_\_\_

**Потпис аутора**

\_\_\_\_\_

## Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

### **Нови модел за утврђивање стратегија за проширење мрежних капацитета**

---

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио.

1. Ауторство (CCBY)
2. Ауторство – некомерцијално (CCBY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CCBY-NC-ND)
- ④ Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CCBY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CCBY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CCBY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци. Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

У Београду, \_\_\_\_\_

**Потпис аутора**

---



1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. **Ауторство - некомерцијално – без прераде.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. **Ауторство - некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. **Ауторство – без прераде.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. **Ауторство - делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.