

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ  
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ

Предраг Н. Јовановић

**СИМУЛАЦИОНИ МОДЕЛ ЗА ПРОЦЕНУ  
ИЗЛАЗНЕ СНАГЕ GSM БАЗНЕ  
СТАНИЦЕ**

докторска дисертација

Београд, 2014

UNIVERSITY OF BELGRADE  
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Predrag N. Jovanović

**SIMULATION MODEL FOR ESTIMATION  
OF GSM BASE STATION OUTPUT  
POWER**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2014

## Информације о ментору и члановима комисије

### Ментор:

Доцент, др Милан Бјелица, Електротехнички факултет Универзитета у Београду

### Чланови комисије:

Ванредни професор, др Милан Илић, Електротехнички факултет Универзитета у Београду

Научни саветник, др Жарко Марков, ИРИТЕЛ а.д. Београд

Ванредни професор, др Александар Нешковић, Електротехнички факултет Универзитета у Београду

Редовни професор, др Ирине Рељин, Електротехнички факултет Универзитета у Београду

*Every great and deep difficulty bears in itself its own solution.*

*It forces us to change our thinking in order to find it.*

*NIELS BOHR*

*Мојој породици, за безрезервну љубав и подршку.*

*Захваљујем се на саветима и помоћи  
ментору, доц. др Милану Бјелици,  
др Жарку Маркову, научном саветнику,  
др Александру Нешковичу, ванредном професору,  
др Александру Леблу, научном сараднику,  
др Драгану Митићу, научном сараднику,  
целокупном сектору за радио-комуникације и колегама из  
института ИРИТЕЛ на сарадњи и подршци,  
као и Електротехничком факултету у Београду.*

## Информације о докторској дисертацији

Наслов рада:	<b>Симулациони модел за процену излазне снаге GSM базне станице</b>
Резиме:	У оквиру докторске дисертација представљени су теоријски поступци који омогућују врло прецизно одређивање зависности излазне снаге GSM базне станице од следећих чинилаца: густине корисника у ћелији, удаљености корисника од базне станице, слабљења сигнала и понашања корисника. Такође су развијени поступци за проверу добијених теоријских резултата. Развијени су симулациони модели за процену вредности излазне снаге сложених модела GSM ћелије као што су: ћелија са великим уделом унутарћелијског саобраћаја, ћелија са великим утицајем ограниченог броја извора саобраћаја, ћелија са сложеном зависношћу расподеле густине корисника. На основу направљених модела, извршена је процена ефикасности појединих метода за уштеду енергије у GSM мрежи, и омогућени су услови за дефинисање стратегија за увођење нових мера уштеде. Значај истраживања је изражен кроз нова сазнања о могућностима уштеде енергије у мобилним мрежама.
Кључне речи:	процена снаге базне станице, енергетска ефикасност, рачунарске симулације, телекомуникационе мреже
Научна област:	Електротехника и рачунарство
Ужа научна област:	Телекомуникације
УДК број:	621.3
Датум прихватања теме:	8.7.2013.

## Information about doctoral dissertation

Title:	<b>Simulation model for estimation of GSM base station output power</b>
Abstract:	<p>In this doctoral dissertation, theoretical methods that allow very accurate dependence estimation of GSM base station output power from several factors such as user's density in radio cell, distance between user and base station, signal attenuation and users behavior, are presented. Also, methods for verification of obtained theoretical results are presented. Simulation models for estimation of base station output power in very complex GSM scenarios, are developed. Special cases, such as cell with large part of intracell traffic, cells with large influence of limited number of traffic sources and cells with very complex dependence of user's density, are analyzed in detail. Based on developed models, efficiency estimation of particular methods for power saving is performed. Therefore, basic conditions to define strategies for introduction of new power saving measures, are provided. Importance of research is pronounced through new knowledge about power saving in mobile networks.</p>
Keywords:	Base station output power estimation, energy efficiency, computer simulation, telecommunication networks
Scientific field:	Electrical Engineering and Computer Science
Scientific discipline:	Telecommunication
UDC number:	621.3
Accepted by the scientific board on:	8.7.2013.

# Садржај

Листа табела ..... I

Листа слика ..... II

Листа скраћеница ..... VI

**1. Увод ..... 1**

1.1 Мотивација ..... 2

1.2 Циљеви ..... 4

1.3 Преглед актуелног стања. .... 6

1.3.1 Технике унапређења енергетске ефикасности ..... 6

1.3.2 Пројекти у области „зелених“ мобилних мрежа ..... 12

1.3.3 Компромиси у „зеленим“ мобилним мрежама ..... 14

1.3.4 Преглед стања у области истраживања дисертације ..... 16

1.3.5 Значај симулационих модела базне станице за оптимизацију енергетске ефикасности. .... 18

1.4 Допринос дисертације ..... 19

1.5 Организација излагања ..... 20

**2. Основи GSM мреже ..... 22**

2.1 Архитектура GSM мреже ..... 23

2.2 Врсте и расподела канала у GSM ..... 26

2.3 Функционалности радио интерфејса и контрола снаге ..... 33

2.4 Утицај удаљености мобилног корисника и базне станице на снагу .. 37

2.5 Ћелијска структура мреже ..... 38

2.6 Утицај околине на слабљење сигнала ..... 41

2.7 Густина мобилних станица у ћелији ..... 43

2.8 Унутарћелијске везе ..... 43



<b>3. Теорија телекомуникационог саобраћаја</b> .....	<b>45</b>
3.1 Основна својства телекомуникационог саобраћаја .....	46
3.2 Процеси генерисања позива и опслуживање .....	50
3.3 Модел савршеног снопа .....	54
3.4 Erlang-ов модел .....	58
3.5 Engset-ов модел .....	62
3.6 Модели са мултидимензионалним саобраћајним процесима .....	66
<b>4. Симулација телекомуникационог саобраћаја</b> .....	<b>70</b>
4.1 Појам симулације .....	71
4.2 Симулација дискретних догађаја .....	73
4.2.1. Организација симулације дискретних догађаја .....	73
4.2.2. Механизам помака времена .....	77
4.3 Основи метода <i>Monte Carlo</i> .....	78
4.4 Генератори случајних бројева и испитивање случајности .....	82
4.5 Генерисање случајне удаљености између мобилне и базне станице .	86
4.6 Обрада резултата симулације .....	88
4.7 Осврт на постојеће симулаторе мобилних мрежа .....	92
<b>5. Прорачун излазне снаге базне станице</b> .....	<b>95</b>
5.1 Увод у анализу излазне снаге базне станице .....	96
5.1.1 Полазне претпоставке и хипотезе .....	96
5.2 Прорачун снаге једног канала базне станице .....	103
5.2.1 Средња снага, функција расподеле вероватноће и густина вероватноће излазне снаге једног канала .....	103
5.2.2 Зависност снаге једног канала од слабљења сигнала. ....	105
5.2.3 Зависност излазне снаге једног канала од расподеле густине корисника у ћелији .....	108
5.3. Прорачун укупне снаге базне станице .....	119
5.3.1 Средња вредност излазне снаге базне станице. ....	119
5.3.2 Зависност излазне снаге од слабљења сигнала .....	120

5.3.3 Зависност излазне снаге од расподеле густине корисника у ћелији .....	121
5.3.4 Зависност излазне снаге од унутарћелијског саобраћаја .....	122
<b>6. Симулациони модел базне станице .....</b>	<b>128</b>
6.1 Симулациони модел једног канала .....	129
6.1.1 Зависност излазне снаге једног канала од слабљења сигнала ...	133
6.2 Симулација модела групе канала .....	137
6.2.1 Зависност излазне снаге од густине корисника .....	143
6.2.2 Зависност излазне снаге од слабљења сигнала .....	155
6.2.3 Зависност излазне снаге од унутарћелијског саобраћаја .....	158
6.2.4 Зависност излазне снаге од ограничености броја извора саобраћаја .....	163
6.2.5 Поређење излазне снаге базне станице у ћелији са ограниченим и неограниченим бројем мобилних станица .....	166
6.2.6 Сложени модели расподеле снаге базне станице. . . . .	167
6.2.7 Зависност средње излазне снаге базне станице од интензитета саобраћаја .....	169
<b>7. Анализа и дискусија резултата .....</b>	<b>172</b>
7.1. Анализа резултата истраживања .....	173
7.2. Области практичне примене резултата .....	176
<b>8. Закључак .....</b>	<b>178</b>
<b>9. Литература .....</b>	<b>183</b>
<b>Биографија кандидата .....</b>	<b>193</b>
<b>Прилози .....</b>	<b>194</b>

## Листа табела

Табела 1.1	Поређење потрошње базних станица у GSM и UMTS мрежи . . . . .	4
Табела 1.2	Статистички подаци (2007) и пројекције (2014, 2020) . . . . .	6
Табела 1.3	Искоришћеност радиофреквенцијског спектра до 6 GHz . . . . .	9
Табела 1.4	Пројекти „зелених“ мобилних мрежа . . . . .	12
Табела 2.1	Подела сигнализационих канала . . . . .	31
Табела 2.2	Класе снаге у GSM . . . . .	36
Табела 6.1	Поређење генератора псеудослучајних бројева . . . . .	129
Табела 6.2	Прорачун вероватноћа стања за <i>Erlang</i> -ову групу . . . . .	132

## Листа слика

Сл. 1.1	Принципски алгоритам за контролу снаге базне станице. . . . .	11
Сл. 1.2	Приказ принципских зависности метрика за стандардизацију енергетске ефикасности . . . . .	15
Сл. 1.3	Приказ структуре модела разматраног у дисертацији. . . . .	19
Сл. 2.1	Основна архитектура GSM мреже . . . . .	23
Сл. 2.2	Подела фреквенцијског опсега у GSM мрежи . . . . .	26
Сл. 2.3	Блок бита за пренос преко временског канала . . . . .	27
Сл. 2.4	Релативна расподела снаге сигнала који носи блок бита . . . . .	28
Сл. 2.5	Дијаграм граничних вредности параметара RXLEV и RXQUAL на основу који се прилагођава предајна снага . . . . .	34
Сл. 2.6	Пример расподела снаге по каналима . . . . .	35
Сл. 2.7	Ћелијска структура мреже . . . . .	38
Сл. 2.8	Покривање ћелије са три “секторизоване” базне станице . . . . .	40
Сл. 2.9	Квалитативни приказ флукуације снаге примљеног сигнала . . . . .	41
Сл. 3.1	Терминологија у теорији саобраћаја . . . . .	47
Сл. 3.2	Дијаграм транзиције стања за неограничен број канала . . . . .	56
Сл. 3.3	Дијаграм транзиције стања за Erlang-ов модел . . . . .	60
Сл. 3.4	Дијаграм транзиције стања за Engset-ов модел . . . . .	63
Сл. 3.5	Дводимензионални дијаграм транзиције стања за систем са губицима . . . . .	66
Сл. 3.6	Реверзибилни Марковљев процес . . . . .	68
Сл. 4.1	Процес симулације . . . . .	72
Сл. 4.2	Организација симулације дискретног догађаја . . . . .	75
Сл. 4.3	Механизам помака за константни прираштај . . . . .	77

Сл. 4.4	Механизам помака на наредни догађај . . . . .	78
Сл. 4.5	Принцип <i>Monte Carlo</i> метода . . . . .	79
Сл. 4.6	Принцип генерисања новог позива и прекидања везе . . . . .	79
Сл. 4.7	Принцип метода инверзне трансформације . . . . .	86
Сл. 4.8	Улазак резултата симулације у стабилно стање . . . . .	92
Сл. 5.1	Симболички приказ излазне снаге базне станице са 8 канала . . . . .	101
Сл. 5.2	Функција расподеле излазне снаге једног канала . . . . .	104
Сл. 5.3	Зависност средње снаге једног канала од слабљења . . . . .	105
Сл. 5.4	Функција густине гама расподеле у зависности од параметара $k$ и $\theta$ . . . . .	107
Сл. 5.5	Неуниформна густина корисника у ћелији . . . . .	108
Сл. 5.6	Профил густине корисника у ћелији . . . . .	109
Сл. 5.7	CDF излазне снаге једног канала за опадајућу и растућу густину корисника . . . . .	111
Сл. 5.8	CDF излазне снаге једног канала за експоненцијалну густину корисника . . . . .	113
Сл. 5.9	Функција густине бета расподеле у зависности од параметара $\alpha$ и $\beta$ . . . . .	114
Сл. 5.10	Поређење CDF-а излазне снаге једног канала за различите вредности параметара $\alpha$ и $\beta$ . . . . .	118
Сл. 5.11	Зависност укупне средње снаге од слабљења . . . . .	120
Сл. 5.12	Средња снага базне станице за линеарно опадајућу (доња линија) и линеарно растућу (горња линија) густину корисника . . . . .	121
Сл. 5.13	Вероватноћа губитка везе у граничним случајевима када постоји само унутарћелијски (црвена линија) и екстерни (плава линија) саобраћај . . . . .	125
Сл. 6.1	Дијаграм тока симулације за генерисање нове везе или прекида постојеће. . . . .	131
Сл. 6.2	Принципски дијаграм тока симулације ( <i>Erlang</i> -ова група) . . . . .	134
Сл. 6.3	CDF снаге једног канала за случај симулације и теоријског прорачуна ( $N = 16, A = 10E, w_{max} = 40 W, R = 12 km, \gamma = 2$ ) . . . . .	135

Сл. 6.4	CDF снаге једног канала за случај симулације и теоријског прорачуна ( $N = 16, A = 10E, w_{max} = 40 W, R = 12 km, \gamma = 3$ ) . . . . .	135
Сл. 6.5	CDF снаге једног канала за случај симулације и теоријског прорачуна ( $N = 16, A = 10E, w_{max} = 40 W, R = 12 km, \gamma = 4$ ) . . . . .	136
Сл. 6.6	CDF снаге једног канала за случај симулације и теоријског прорачуна ( $N = 16, A = 10E, w_{max} = 40 W, R = 12 km, \gamma = 5$ ) . . . . .	136
Сл. 6.7	Однос средње снаге једног канала и максималне снаге у зависности од $\gamma$ . . . . .	137
Сл. 6.8	CDF излазне снаге базне станице за теоријски случај и симулацију . . . . .	141
Сл. 6.9	CDF излазне снаге базне станице ( <i>Erlang</i> -модел) ( $N = 14, w_{max} = 40 W, R = 10 km, \gamma = 4$ ) . . . . .	142
Сл. 6.10	CDF излазне снаге базне станице ( <i>Erlang</i> -ов модел) ( $N = 30, w_{max} = 40 W, R = 10 km, \gamma = 4$ ) . . . . .	143
Сл. 6.11	Дијаграм тока за неуниформну густину корисника у ћелији . . . . .	144
Сл. 6.12	Блок за генерисање удаљености и прорачун снаге . . . . .	145
Сл. 6.13	CDF излазне снаге базне станице за опадајућу (плава линија) и растућу (црвена линија) густину корисника . . . . .	146
Сл. 6.14	Поређење CDF-а излазне снаге базне станице за опадајућу и растућу густину добијених апроксимацијом (означене са 1) и трансформационим емпиријским методом (означене са 2) . . . . .	147
Сл. 6.15	Функција расподеле бета функције за $\alpha = 0,5, \beta = 0,5$ . . . . .	148
Сл. 6.16	Поређење CDF-а излазне снаге базне станице у зависности од саобраћаја за случај густине са слике 6.15. ( $N = 16, w_{max} = 40 W, R = 10 km, \gamma = 3$ ) . . . . .	148
Сл. 6.17	Функција расподеле бета функције за $\alpha = 5, \beta = 1$ . . . . .	149
Сл. 6.18	Поређење CDF-а излазне снаге базне станице у зависности од саобраћаја за случај густине са слике 6.17. ( $N = 16, w_{max} = 40 W, R = 10 km, \gamma = 3$ ) . . . . .	150
Сл. 6.19	Функција расподеле бета функције за $\alpha = 1, \beta = 3$ . . . . .	151

Сл. 6.20	Поређење CDF-а излазне снаге базне станице у зависности од саобраћаја за случај густине са слике 6.19. ( $N = 16, w_{max} = 40 W, R = 10 km, \gamma = 3$ ) . . . . .	151
Сл. 6.21	Функција расподеле бета функције за $\alpha = 2, \beta = 2$ . . . . .	152
Сл. 6.22	Поређење CDF-а излазне снаге базне станице у зависности од саобраћаја за случај густине са слике 6.21. ( $N = 16, w_{max} = 40 W, R = 10 km, \gamma = 3$ ) . . . . .	153
Сл. 6.23	Функција расподеле бета функције за $\alpha = 2, \beta = 5$ . . . . .	154
Сл. 6.24	Поређење CDF-а излазне снаге базне станице у зависности од саобраћаја за случај густине са слике 6.23. ( $N = 16, w_{max} = 40 W, R = 10 km, \gamma = 3$ ) . . . . .	154
Сл. 6.25	Принципски дијаграм тока симулације . . . . .	156
Сл. 6.26	Поређење CDF-а излазне снаге базне станице у зависности од саобраћаја за линеарно растуће слабљење од центра ка периферији ( $N = 16, w_{max} = 40 W, R = 10 km$ ) . . . . .	157
Сл. 6.27	Поређење CDF-а излазне снаге базне станице у зависности од саобраћаја за линеарно опадајуће слабљење од центра ка периферији ( $N = 16, w_{max} = 40 W, R = 10 km$ ) . . . . .	157
Сл. 6.28	Начелни дијаграм тока симулације за случај унутарћелијског саобраћаја . . . . .	159
Сл. 6.29	Утицај унутарћелијског саобраћаја на повећање излазне снаге базне станице ( $N = 10, w_{max} = 40 W, R = 10 km, \gamma = 3$ ) . . . . .	161
Сл. 6.30	Принципски дијаграм тока симулације ( <i>Engset</i> -ова група) . . . . .	164
Сл. 6.31	CDF излазне снаге базне станице ( <i>Engset</i> -ов модел) ( $N = 14, w_{max} = 40 W, R = 10 km, \gamma = 4, M = 21$ ) . . . . .	165
Сл. 6.32	CDF излазне снаге базне станице ( <i>Engset</i> -ов модел) ( $N = 30, w_{max} = 40 W, R = 10 km, \gamma = 4, M = 45$ ) . . . . .	165
Сл. 6.33	CDF излазне снаге базне станице (поређење модела) ( $N = 6, A = 4,62, w_{max} = 40 W, R = 10 km, \gamma = 4, M = 9$ ) . . . . .	166
Сл. 6.34	CDF излазне снаге базне станице (поређење модела) ( $N = 6, A = 4,62, w_{max} = 40 W, R = 10 km, \gamma = 4, M = 9$ ) . . . . .	167
Сл. 6.35	CDF излазне снаге базне станице (поређење модела) ( $N = 6, A = 4,62, w_{max} = 40 W, R = 10 km, \gamma = 4, M = 9$ ) . . . . .	168

Сл. 6.36	CDF излазне снаге базне станице (поређење модела) ( $N = 6, A = 4,62, w_{max} = 40 W, R = 10 km, \gamma = 4, M = 9$ ) . . . . .	168
Сл. 6.37	CDF излазне снаге базне станице (поређење модела) ( $N = 6, A = 4,62, w_{max} = 40 W, R = 10 km, \gamma = 4, M = 9$ ) . . . . .	169
Сл. 6.38	Средња снаге базне станице ( $N = 16, w_{max} = 40 W, R = 10 km, \gamma = 3,5$ ) . . . . .	170
Сл. 6.39	Средња снаге базне станице ( $N = 32, w_{max} = 40 W, R = 10 km, \gamma = 3,5$ ) . . . . .	170



## Листа скраћеница

### 2

2G Друга генерација система мобилне телефоније

### 3

3G Трећа генерација система мобилне телефоније

### 4

4G Четврта генерација система мобилне телефоније

### A

AGCH *Access Grant CHannel*  
AUC *Authentication Center*

### B

BW *Bandwidth*  
BCH *Broadcast CHannel*  
BCCH *Broadcast Control CHannel*  
BSIC *Base Station Identity Code*  
BTS *Base Transciever Station*  
BSS *Base Station Subsystem*  
BSC *Base Station Controller*

### C

CO<sub>2</sub> Угљен- диоксид  
CDF *Cumulative Distribution Function*  
CI *Cell ID*  
CA *Cell Allocation*  
CCCH *Common Control Channel*

CIR *Carrier to Interference Ratio*

## D

dB Децибел  
dBm Децибел у односу на један миливат  
DL *Delay*  
DE *Deployment Efficiency*  
DCCH *Dedicated Control Channel*

## E

EARTH *Energy Aware Radio and neTworks tecHnologies*  
E<sup>3</sup>F *EARTH Energy Efficiency Evaluation Framework*  
ETSI *European Telecommunications Standards Institute*  
EE *Energy Efficiency*  
EIR *Equipment Identity Register*

## F

FACCH *Fast Associated Control CHannel*  
FCCH *Frequency Correction CHannel*  
FP7 *Framework Programme 7*

## G

GREEN *Globally Resource-optimized and Energy-Efficient Networks*  
GSM *Global System for Mobile communication*  
GHz Гигахерц  
GTNetS *Georgia Tech Network Simulator*  
GPSS/H *General Purpose Simulation System / H version*  
GW Гигават

## H

HSPA *High Speed Packet Access*  
HLR *Home Location Register*

## I

ICT *Information and Communication Technology*  
IMEI *International Mobile station Equipment Identity*  
IMSI *International Mobile Subscriber Identity*

## **K**

KWh                      Киловатт-час

## **L**

LMSI                      *Local Mobile Station Identity*

LAI                        *Location Area Identity*

LTE                        *Long-term evolution (4<sup>th</sup> generation of mobile systems)*

## **M**

MS                         *Mobile station*

MSISDN                 *Mobile Subscriber Integrated Services Digital Network-Number*

MSRN                    *Mobile Station Roaming Number*

MHz                        Мегахерц

## **N**

NSS                        *Network SubSystem*

ns-2                        *Network Simulator-2*

ns-3                        *Network Simulator-2*

NCH                        *Notification CHannel*

NetSim                    *Network Simulator*

## **O**

OPNET                    *Optimized Network Engineering Tool*

OPERA-Net              *Optimizing Power Efficiency in mobile RADio NETworks*

## **P**

PDF                        *Probability Density Function*

PW                         *Power*

PCH                        *Paging CHannel*

PMR                        *Private Mobile Radio*

## **Q**

QoS                        *Quality of Service*

## **R**

RACH *Random Access CHannel*  
RNG *Random Number Generator*

## S

SDCCH *Stand alone Dedicated Control CHannel*  
SACCH *Slow Associated Control CHannel*  
SCH *Synchronization CHannel*  
SE *Spectrum Efficiency*  
SSFNet *Scalable Simulation Framework Models*

## T

TDMA *Time Division Multiple Access*  
TA *Timing Advance*  
TCH *Traffic CHannel*  
TMSI *Temporary Mobile Station Identity*  
TWh *Терават-час*  
TS *Time Slot*  
TRAU *Transcoding and Rate Adaptation Unit*  
TANGO *Traffic-Aware Network planning and Green Operation*

## U

UMTS *Universal Mobile Telecommunications System*

## V

VLR *Visitor Location Register*

## W

WiMAX *Worldwide Interoperability for Microwave Access*  
WBar



# 1. УВОД

## 1.1 Мотивација

Коришћење мобилних комуникација је у великом порасту, па су све израженији проблеми ограничености енергетских ресурса и емисије угљен-диоксида. Пре око 5 година у истраживачкој заједници се формулисао став да се мора приступити строгој уштеди енергије на овом пољу због њене све веће цене и потребе очувања животне средине на коју повећана производња енергије има погубно дејство. Програм мера уштеде енергије је назван *GREEN Radio*, што је скраћеница од *Globally Resource-optimized and Energy-Efficient Networks* [1]. *GREEN Radio* је правац у истраживању будућих архитектура и технологија мрежа мобилних корисника (у даљем тексту се под мобилном мрежом подразумева мрежа мобилних корисника) усмерених ка повећању њихове енергетске ефикасности. Пре успостављања програма *GREEN Radio*, било је покушаја усмерених ка уштеди енергије у мобилним мрежама попут развоја веома ефикасних појачавача снаге или смањења губитака у коаксијалним кабловима [2]. Ови покушаји су остали изоловани и нису могли да формулишу глобалну визију о начинима уштеде енергије. С друге стране, *GREEN Radio* је усмерен ка новим решењима заснованим на „*top-down*“ архитектури и удруженом развоју на свим системским нивоима и протоколима, што није могуће остварити изолованим напорима. Овај програм мера има неколико праваца од којих је посебно интересантан онај у коме се уштеда енергије остварује коришћењем статистичких особина телекомуникационог саобраћаја; овај правац се назива и *TANGO (Traffic-Aware Network planning and Green Operation)* [3]. Да је подешавање снаге напајања у мобилним мрежама један од значајних чинилаца уштеде енергије у будућности, може се видети из бројних референци. Изнети су резултати мерења потрошње енергије на базним станицама у зависности од саобраћаја [4]. Показано је и како се може штедети енергија коришћењем микро ћелија у мрежи, уколико саобраћај то дозвољава [5,6]; такође се предлаже подешавање рада базних станица према тренутним саобраћајним захтевима [7,8]. Све је ово индикација да уштеда енергије и заштита животне средине постају глобални захтев и неизбежан тренд, где истраживачи и инжењери треба да усмере пажњу ка развоју енергетски ефикасних архитектура и технологија. Важно је напоменути да, иако уштеда

енергије јесте примарни циљ, она се не сме остваривати на штрб квалитета сервиса (*Quality of Service, QoS*).

Енергетска ефикасност, односно уштеда енергије постаје заштитни знак за развој модерних мобилних мрежа. Јављају се различити приступи за сагледавање овог проблема, као и методе за оптимизацију односа перформанси и потрошње енергије. Све већи број академских институција, великих компанија и мобилних оператера издваја огромна средства за решавање овог проблема. Енергетска ефикасност постаје један од главних критеријума код пројектовања и експлоатације телекомуникационих мрежа. Неке од метода за постизање високе енергетске ефикасности се могу применити и на постојеће мреже и базне станице, без великих измена на нивоу хардвера, евентуално само на протоколском нивоу, док други методи, пак, захтевају замену хардверских ресурса базне станице или целе мреже. Значај разматрања базних станица, као доминантног потрошача у мобилним мрежама, може се илустровати чињеницом да је њихов број у свету око 5 милиона, с просечном потрошњом од око 1 kW, те се долази до помало застрашујућег податка да је укупна потрошња базних станица реда 5 GW [9]. То је знатно већа потрошња у односу на ону која отпада на језгро мреже, која је реда величине 0,1 GW.

Из овог кратког описа проблема се може закључити да је уштеда енергије у мобилним мрежама актуелан и важан задатак и да се последњих година чине озбиљни напори на том пољу. Један од поменутих начина уштеде енергије је управљање снагом базних станица. Познавање зависности излазне снаге базне станице од чинилаца као што су просторна расподела корисника, интензитет саобраћаја и карактеристика простирања, је неопходан услов за оптимално динамичко управљање снагом базне станице. Оптимално управљање подразумева максимизацију спектралне ефикасности уз минималну потрошњу енергије у условима задржавања захтеваног квалитета сервиса. Ипак, у значајном броју случајева, веома је тешко аналитички одредити зависност излазне снаге базне станице од поменутих чинилаца. Стога се може истаћи да су одговарајући рачунарски и симулациони поступци саставни део оптимизационог процеса управљања снагом базних станица у циљу уштеде енергије односно повећања енергетске ефикасности.



## 1.2 Циљеви

У овој докторској дисертацији се разматра енергетска ефикасност у GSM мрежи. Иако може да се расправља о томе да је GSM технологија на заласку, истраживање у овом раду је усмерено ка GSM из разлога што су GSM мобилне мреже и даље веома распрострањене, са великим бројем корисника. Такође, код мулти-мрежних терминала, GSM је са економског становишта веома погодан избор код преноса говорног саобраћаја и сервиса кратких текстуалних порука. Вероватнији сценарио је коегзистирање GSM и модернијих технологија у блиској будућности. Другим речима, процес напуштања GSM технологије ће тећи постепено. Архитектура GSM није усклађена са модерним трендовима очувања енергије и значај разматрања GSM се може добро илустровати разматрањем резултата мерења потрошње базних станица у GSM (Siemens BTS 240 [10]) и UMTS мрежи (NEC Siemens NB-440 [11]) који су приказани у табели 1.1:

Табела 1.1 Поређење потрошње базних станица у GSM и UMTS мрежи.

Тип области	GSM		UMTS	
	Урбана област	Рурална област	Урбана област	Рурална област
Опрема	300 W	200 W	400 W	250 W
Предајник	2200 W	700 W	800 W	300 W
<b>BTS потрошња</b>	<b>2500 W</b>	<b>900 W</b>	<b>1200 W</b>	<b>500 W</b>
AC/DC конверзија	370 W	130 W	150 W	70 W
RF опрема	100 W	100 W	100 W	100 W
<b>Потрошња сајта</b>	<b>3000 W</b>	<b>1130 W</b>	<b>1450 W</b>	<b>720 W</b>
Систем за хлађење	700 W	300 W	400 W	-
<b>Укупна потрошња</b>	<b>3700 W</b>	<b>1430 W</b>	<b>1850 W</b>	-

Из табеле се може уочити да GSM базне станице имају већу потрошњу од UMTS базних станица, па стога има и много више простора за уштеду енергије.

План за систематско напуштање GSM технологије је везан за 2025. годину. Ово се ипак у већој мери односи на земље запада, што можда неће бити случај са

земљама у развоју, где ће ова технологија имати и дужи радни век. Све ово говори о важности разматрања GSM као и даље веома актуелне и присутне технологије. Према томе, водећи се принципима енергетске ефикасности, могуће је остварити значајну уштеду у даљој експлоатацији GSM мреже.

Процена излазне снаге базне станице у циљу оптималног управљања њеном потрошњом је важна ставка у области спектралне и енергетске ефикасности. Проблем који се овде јавља је зависност снаге од више случајних величина, попут интензитета саобраћаја, просторне расподеле корисника, услова простирања и унутарћелијских веза; стога је јасно да статистичке особине излазне снаге базне станице представљају здружену статистичку расподелу претходно набројаних случајних величина.

Основни циљ ове докторске дисертације је **налажење рачунарског и симулационог поступка за одређивање зависности излазне снаге базне станице у GSM мрежи од интензитета саобраћаја, густине и положаја корисника, утицаја унутарћелијских веза, као и слабљења нивоа сигнала.** Овај задатак је могуће решити следећим корацима:

- налажењем зависности емисионе снаге једног корисничког канала од случајног положаја корисника,
- истраживањем утицаја тренутне расподеле густине корисника на расподелу укупне средње емисионе снаге,
- истраживањем утицаја услова пропагације на слабљење сигнала,
- израдом симулационог модела за проверу једноставних модела и познатих резултата,
- израдом симулационог модела базне станице за проверу сложених модела у погледу расподеле густине корисника у ћелији,
- израдом симулационог модела базне станице за проверу сложених модела у погледу слабљења сигнала,
- израдом симулационог модела базне станице за проверу сложених модела са великим унутарћелијским саобраћајем и
- израдом симулационог модела базне станице за проверу сложених модела са великим утицајем ограниченог броја извора саобраћаја.

### 1.3 Преглед актуелног стања

#### 1.3.1. Технике унапређења енергетске ефикасности

Експанзија у развоју мобилних комуникација огледа се у наглom повећању броја мобилних претплатника. Док је 1993. године регистровано око милион корисника GSM мреже, тај број је 2007. године је износио око 2,95 милијарди, што је представљало половину светске популације. Пројекције су да ће закључно са овом годином број корисника мобилне телефоније достићи 5,6 милијарди, а до 2020. године рекордних 7,6 милијарди, што би одговарало укупној светској популацији [12]. Тренд наглог пораста броја корисника GSM последњих неколико година илустративно је приказан у табели 1.2. У развијеним земљама број мобилних претплатника је око 95% броја становника, а у земљама у развоју тај проценат износи барем 45%.

Табела 1.2 Статистички подаци (2007) и пројекције (2014, 2020), према [8].

Година	2007	2014	2020
Број претплатника (у милијардама)	2,95	5,6	7,6
Број базних станица (у милионима)	3,3	7,6	11,2
Просечна потрошња по локацији (у KWh)	1,7	1,3	1,1
Потрошња радио приступних мрежа(у TWh)	49	84	99
Укупна емисија CO <sub>2</sub> у милионима тона	86	170	235

Вртоглав развој информационо-комуникационих технологија (*Information and Communication Technology, ICT*) знатно је повећао захтеве за енергијом и проузроковао повећану емисију угљен-диоксида у атмосферу, што у крајњој линији, доводи до проблема глобалног загревања [13]. Данас су мобилне мреже, као главни део ICT сектора, усмерене ка повећању капацитета и разноврсности сервиса, не посвећујући довољно пажње енергетској ефикасности. Повећана потрошња енергије и забринутост за животну средину створили су потребу за енергетски ефикаснијим “зеленим” мобилним мрежама. Информационе и комуникационе технологије учествују са око 3% у укупној светској потрошњи енергије [14, 15]. Битно је истаћи да чак 57% укупне потрошње енергије у ICT сектору отпада на кориснике и уређаје у мобилним и бежичним мрежама [16], и

тај тренд је све израженији [17]. Утицај на глобалну емисију угљен-диоксида је износио око 2% у 2007. години, где на мобилне мреже отпада око 0,2% [18]. У [18] је направљена пројекција да ће до 2020. године глобална емисија угљен-диоксида за мобилне мреже износити око 0,4%. Сви ови подаци указују да је штедња енергије императив у годинама које долазе. Према томе, “зелене” технике треба да побољшавају енергетску ефикасност са задржавањем задовољавајућег нивоа *QoS*, тако да се постигне прихватљив компромис.

Велику пажњу истраживањима у мобилним мрежама почели су да посвећују и привреда и академски кругови. То доводи до великих напора на развоју нових енергетски ефикасних архитектура, протокола и алгоритама за различите врсте мобилних мрежа. Истраживања која су спровођена усмерена су ка појединим аспектима мобилних мрежа, који се могу класификовати у односу на пет основних елемената мобилне ћелијске мреже: центре података, макроћелију, фемтоћелију, мобилне терминале и сервисе.

Када је реч о центрима за податке (*Data Center*), већина “зелених” техника усмерена је ка штедљивој расподели ресурса (*ON/OFF Resource Allocation*) и техници виртуализације (*Virtualization Technique*), узимајући у обзир саобраћајно оптерећење и захтеве корисника. Са аспекта хлађења центара за податке, уведене су нове унапређене методе које доприносе значајном смањењу потрошње енергије за одржавање ниских температура за сервере у центрима за податке и системима за климатизацију.

Код макроћелија (*Macrocells*), базе станице доприносе потрошњи мобилне мреже са 60% [19], услед предимензионисаности у погледу потрошње енергије због краткотрајних оптерећења саобраћаја (енергетска редунданса). Технике за смањење потрошње се заснивају на подешавању базних станица (укључивање и искључивање) у зависности од динамике саобраћајног оптерећења (*Dynamic Scheduling of Base Stations*). Развијене су и ефикасне технике за зумирање ћелија (*Cell Zooming*), где се адаптивно подешава димензија ћелија у зависности од саобраћајног оптерећења, захтева корисника и стања на саобраћајном каналу [20]. Даље, мерењима је утврђено да чак 50 % потрошње енергије у базној станици отпада на појачаваче снаге [21], те је стога предложено динамичко подешавање

напона напајања базне станице у односу на излазни сигнал како би се смањили губици снаге и маргина напона напајања појачавача снаге [22].

Фемтоћелије (*Femtocells*) постају веома интересантне развојем WiMAX и LTE мрежа [23], а карактерише их побољшана покривеност и повећање капацитета, уз смањену потрошњу базне станице. “Зелене” технике код фемтоћелија се најчешће свде на оптимизацију покривања с контролом снаге (*Coverage Optimization with Power Control*) и избегавање интерференције (*Interference Avoidance*).

Када је реч о мобилним терминалима, већина “зелених” техника прати три правца: профилисање енергије, коришћење вишеструких радио интерфејса и ефикасан пренос. Профилисање енергије је засновано на обимном и детаљном знању о свим захтевима за енергију, ресурсима, саобраћајним обрасцима и понашању корисника [24]. Већина данашњих мобилних терминала је опремљена вишеструким радијом као што је Bluetooth, Wi-Fi и 3G, те се развијају алгоритми за учење и предвиђање расположивости мрежних ресурса да би се аутоматски пребацили на одговарајући радио интерфејс у различитим режимима мреже [25]. Важно је напоменути да пренос (примопредаја) представља режим рада мобилног терминала с највећом потрошњом енергије [24], тако да су потребне енергетски ефикасне архитектуре да би продужио животни век батерије мобилног терминала и задржао прихватљив ниво за *QoS*.

Претпоставља се да ће у 2015. години мобилне апликације и сервиси генерисати 26 пута већи саобраћај него у 2010 [26], те се стога морају развијати са свешћу о енергетској ефикасности. Постоје три правца за развој “зелених” апликација и сервиса који укључују дизајн са штедњом енергије, адаптирање на основу предвиђања и кеширање засновано на прокси серверу. Основни приступ “зеленим” мобилним апликацијама је да се уведе одређени систем штедње енергије у сам дизајн (*Inherent Power-saving Design*). Други начин је развијање енергетски ефикасних апликација на основу предвиђања активности апликација учењем обрасца историје активности (*Prediction based Adaptation*). Расподељени прокси сервери са кеширањем (*Proxy-based Caching*) ће утицати на мању потрошњу и побољшање перформанси.

Један од проблема модерних телекомуникационих система је чињеница да је радиофреквенцијски спектар ограничен природни ресурс. Наиме, већина корисника расподељена је у веома ограниченом делу радиофреквенцијског спектра, док остатак спектра није оптимално искоришћен, тј. заузетост спектра је неравномерна. Расподела искоришћења радиофреквенцијског спектра до 6 GHz је дата у табели 1.3 [27].

Табела 1.3 Искоришћеност радиофреквенцијског спектра до 6 GHz према [27].

ОПСЕГ [GHz]	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6
ЗАУЗЕТОСТ [%]	54,4	35,1	7,6	0,25	0,128	4,6

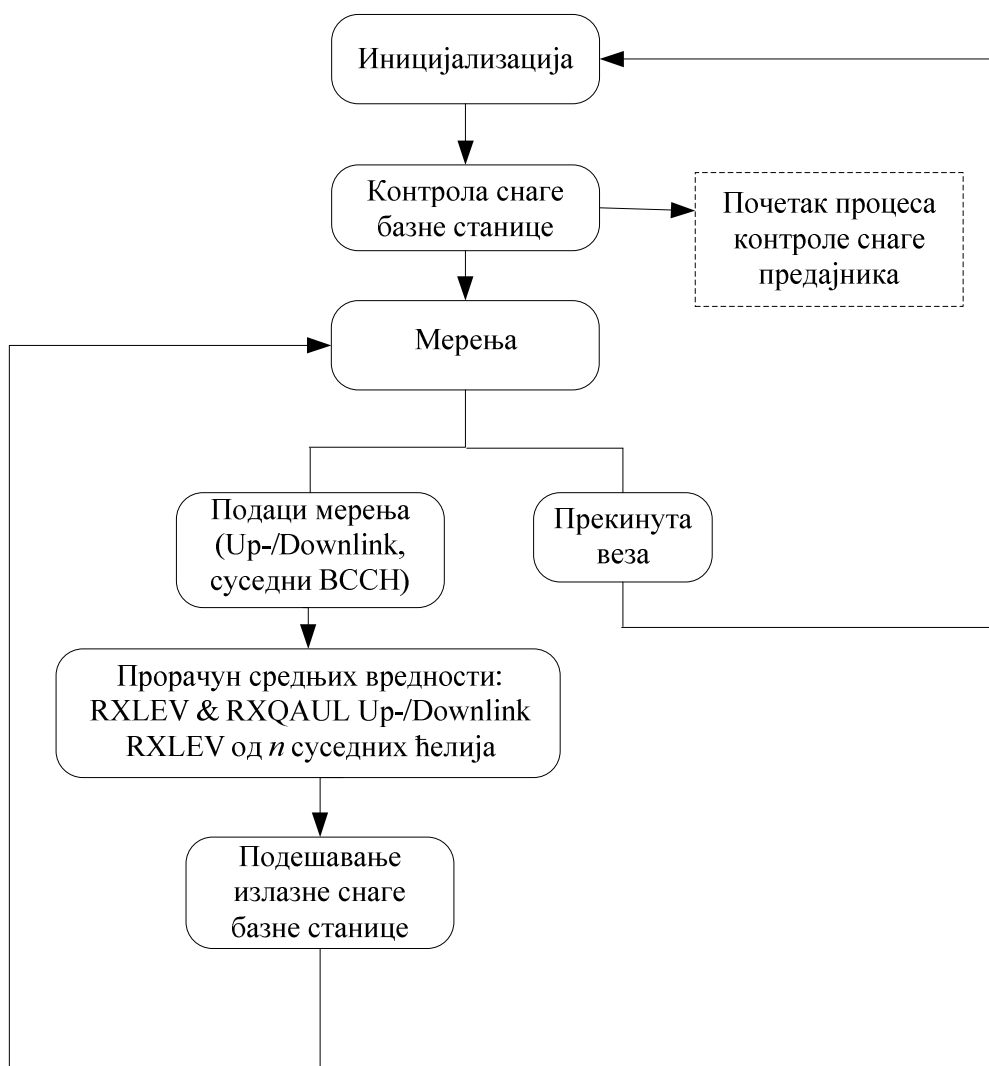
Из табеле је евидентно да је изнад 3 GHz заузето мање од 5 % спектра. Потенцијално решење за овај проблем је концепт когнитивног радија (*Cognitive Radio*) [27]. Технике когнитивног радија омогућавају мрежним системима или чворовима да мењају параметре предаје и пријема, односно да се подешавају и комуницирају користећи различите делове радиофреквенцијског спектра да би се избегле сметње између корисника. Повећање искоришћености спектра заснива се на динамичкој расподели саобраћаја између различитих радио-приступних технологија (GSM/UMTS) и врста базних станица (*macrocell / microcell / picocell / femtocell*). Према томе, технике когнитивног радија омогућавају ефикасно искоришћавање спектра и доприносе значајном напретку по питању побољшања енергетске ефикасности мобилних радио система. Ипак, због ограничења у развоју хардвера, велики део истраживања у овој области остаје у домену теорије и симулација. У будућности ће се развој метода когнитивног радија огледати у интелигентном осматрању спектра, његовој динамичкој расподели и поузданом управљању и располагању ресурсима спектра.

Посебна област у којој се може остварити значајна уштеда енергије је оптимизација потрошње базних станица. Базне станице доприносе укупној потрошњи мобилне мреже са око 70%. Може се предложити пет стратегија за смањење потрошње базних станица: повећавање линеарности и ефикасности појачавача, уклањање *feeder* каблова, алтернативни системи хлађења, алтернативни извори енергије и смањење снаге током периода малог интензитета

саобраћаја. Приближно се 50% повећава ефикасност базне станице директним повезивањем RF радио једнице са антенном базне станице (уклањање *feeder-a*), међутим, када се урачунају губици услед хлађења, одвођења топлоте и вентилатора, долази се до реалнијег податка од око 34% [28]. Систем за хлађење кабинета базне станице доприноси потрошњи са око 25%. Током зимског периода, систем за хлађење се може у потпуности искључити. Такође, за базне станице малог и средњег капацитета, напајање је реализовано обновљивим изворима енергије, најчешће соларно или енергијом ветра. Коришћењем обновљивих извора енергије, остварује се уштеда од око 10%. Висока линеарност и ефикасност RF појачавача снаге је од изузетног значаја за постизање енергетске ефикасности у мобилним мрежама. Коришћењем техника за повећање линеарности и ефикасности појачавача, могуће је остварити уштеду реда 30%.

Други фактор са великим утицајем на укупну потрошњу базне станице је интензитет саобраћаја. Саобраћајно оптерећење у мрежи варира у зависности од доба дана и ноћи. Интуитивно је јасно да је знатно мањи обим саобраћаја током ноћи. Базна станица континуално емитује снагу ВССН носиоца без обзира на интензитет саобраћаја. Током ноћи, интензитет саобраћаја је веома низак, па је снага ВССН носиоца неискоришћена. Према томе, у периодима када је интензитет саобраћаја мали, поготову током ноћи, неки од предајника или сектора базне станице могу да се пребаце у *standby* мод или мод искључења преко контролера базне станице, без утицаја на сервисе и капацитет. Процена је да је могућа уштеда енергије око 46% искључивањем снаге ВССН носиоца или предајника у периодима малог интензитета саобраћаја, или евентуалним пребацивањем у *sleep* мод. Када се интензитет саобраћаја повећа, корисницима је обезбеђен сервис коришћењем других преклапајућих ћелија у систему. Овај метод уштеде има смисла у урбаним срединама, где су број базних станица и густина корисника велики, па стога је и обим саобраћаја велики. Другим речима, у урбаним срединама се преклапају дијаграми зрачења, па се искључивањем појединих базних станица (сектора) не нарушава покривеност. Руралне станице, које услужују огромне сервисне зоне, не могу се искључивати, те се стога се јасно види и значај ефикасних алгоритама за оптимизацију контроле снаге у овом случају.

На слици 1.1 је приказан принципски алгоритам динамичке контроле снаге базне станице. По иницијализацији и почетку процеса управљања снагом, приступа се периодичним мерењима (сваких 480 ms) и врши се усредњавање. Из мерења се излази само услучају да се прекине веза. На основу резултата мерења, врши се подешавање снаге у зависности од тренутног стања у ћелији. Потом се поново улази у процес мерења и тај циклус се периодично понавља.



Сл. 1.1 Принципски алгоритам за контролу снаге базне станице.



### 1.3.2. Пројекти у области „зелених“ мобилних мрежа

Последњих година постоји тренд великих улагања у тзв. „зелене“ пројекте (*green projects*) кроз истраживање, експерименте и развој. Преглед пројеката „зелених“ мобилних мрежа (*green mobile networks*) је приказан у табели 1.4 [29].

Табела 1.4 Пројекти „зелених“ мобилних мрежа [29].

<i>Пројекат</i>	<i>Регион</i>	<i>Организатор</i>	<i>Област</i>	<i>Учесници</i>
EARTH	Европа	Европска комисија FP7 IP	Мобилне мреже	Мобилни оператери и истраживачке организације
Green IT	Јапан	МЕТИ & JEITA	IT	Преко 100 компанија, института и организација
Green Touch	Глобално	GreenTouch Consortium	Мобилне мреже	Експерти из индустрије и академских кругова
OPERA-Net	Европа	CELTIC/EUREKA	Мобилне мреже	Мобилни оператери
GREEN-T	Европа	CELTIC	Мобилне мреже (4G)	Мобилни оператери
GreenRadio	В.Британија	MVCE	Базне станице	Универзитети у Великој Британији
GSMAMEE	Глобално	GSM Association Congress	Мобилне мреже	Преко 800 оператора и 200 компанија

Почетак револуције „зелених“ мобилних мрежа је проистекао из седмог оквирног пројекта Европске комисије (*Framework Programme 7*), у оквиру кога је покренуто више дугорочних истраживачких пројеката међу којима се истиче пројекат *EARTH (Energy Aware Radio and neTworks tecHnologies)* [30], усмерен ка испитавању енергетске ефикасности мобилних мрежа. Акцент је стављен на испитивање теоријских и практичних ограничења енергетске ефикасности постојећих мобилних мрежа, развој нове генерације енергетски ефикасне опреме, развој стратегија и решења за управљање мрежама са задржавањем великог капацитета и бескомпромисног квалитета сервиса. У пракси, пројекат *EARTH* је

углавном усмерен на LTE мобилне ћелијске системе, али се разматрају и 3G мреже (UMTS/HSPA). Циљ пројекта је било смањење потрошње енергије за 50% без деградације квалитета сервиса и успешно је окончаан у јуну 2012. године. На основу добијених резултата, *EARTH* је дефинисао метод процене енергетске ефикасности под називом *E<sup>3</sup>F (EARTH Energy Efficiency Evaluation Framework)*, чији се резултати примењују у *ETSI* документу “*Measurement Method for Energy Efficiency of Wireless Access Network Equipment*” [31].

Пројекти *OPERA-Net (Optimizing Power Efficiency in mobile RAdio NETworks)* [32] и *GREEN-T* [33], усмерени су ка решавању проблема потрошње енергије надлазећих мобилних система кроз испитивање и демонстрирање техника уштеде енергије. Ови пројекти имају свеобухватан приступ за оптимизацију ефикасности снаге у хетерогеним мобилним широкопојасним мрежама (4G) осврћући се на више циљева, попут побољшања метрика енергетске ефикасности система, инфраструктуре и терминала, нових величина за процену енергетске ефикасности, когнитивног радија, протока података, *QoS* итд. Такође, развијена је свеобухватна методологија моделирања 2G и 3G радиоприступних мрежа. Главни допринос ових пројеката је разрада метода уштеде енергије попут реконфигурације мрежа у зависности од саобраћајног оптерећења, адаптације зоне покривања базних станица на основу тренутног саобраћајног оптерећења и расподеле саобраћаја између различитих типова мрежа. Ипак, не разматрају се само нове архитектуре и технологије, већ се наглашава значај унапређење постојећих мрежа са становишта енергетске ефикасности. Пројекат *OPERA-Net* се наставља кроз пројекат *OPERA2*, чији је циљ подршка стандардизацији метода процене енергетске ефикасности мобилних мрежа.

Јапанска влада је исказала интересовање за „зелене“ технологије кроз пројекат *Green IT* [34] усмерен на технике енергетске ефикасности центара за податке и мрежа, и охрабривање сарадње индустрије и академских кругова у циљу повећања енергетске ефикасности мрежа и рачунара.

### 1.3.3. Компромиси у „зеленим“ мобилним мрежама

Посебан аспект у концепту „зелених“ технологија је компромис између енергетске ефикасности на једној страни и квалитета сервиса на другој. Многе технике енергетске ефикасности у мобилним мрежама дају резултате на уштрб перформанси система. Наиме, императив је развој одговарајућих техника које истовремено балансирају капацитет мреже, потрошњу енергије и одговарајући квалитет сервиса.

Тренутно стање ствари указује на проблем непостојања стандарда и метрика за квалитативно и квантитативно описивање и процену енергетске ефикасности; стога је неопходно дефинисати оквире за интеграцију и стандардизацију. Уочено је да је основна структура оквира за стандардизацију енергетске ефикасности заснована на 4 компромиса: компромису између трошкова и енергетске ефикасности, компромису између спектралне ефикасности и енергетске ефикасности, компромису између ширине опсега и снаге, те компромис између кашњења и снаге [2].

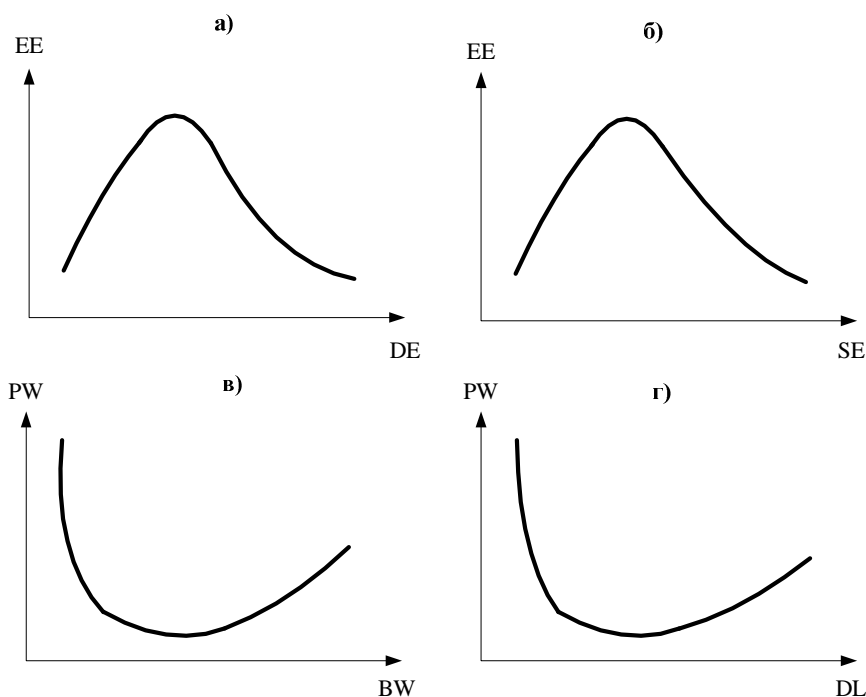
Компромис између трошкова и енергетске ефикасности (*Deployment Efficiency [DE]-Energy Efficiency [EE]*) се заснива на балансирању трошкова, перформанси и потрошње енергије у целокупној мрежи. Трошкови и енергетска ефикасност су метрике које често воде до опречних критеријума за планирање мреже. На слици 1.2.а, приказан је график зависности енергетске ефикасности од трошкова у реалном случају [2].

Компромис између спектралне ефикасности и енергетске ефикасности (*Spectrum Efficiency [SE]-Energy Efficiency [EE]*) се заснива на балансирању између доступног протока и потрошње енергије у систему. Стратегије и услови преноса попут удаљености, формата за модулисање и кодирање, и алгоритама за управљање ресурсима имају велики утицај на однос између спектралне и енергетске ефикасности. На слици 1.2.б, приказан је квалитативни график зависности енергетске од спектралне ефикасности у реалном случају [2].

Компромис између ширине опсега и снаге (*Bandwidth [BW]-Power [PW]*) је посебно значајан, пошто су ширина опсега и снага најбитнији, али истовремено и најограниченији ресурси у мобилним бежичним мрежама. За дати проток, повећање ширине опсега сигнала је пожељно да би се смањила предајна снага и

тима повећала енергетска ефикасност. Код стратегија “зеленог” преноса се прво детектује неискоришћени део спектра користећи технике когнитивног радија, а потом се подешавају модулације према расположивој ширини опсега. Код реалних система потрошња енергије се скалира са ширином опсега, што повезује снагу и ширину опсега, а што даље значи да снага и ширина опсега нису независне величине. На слици 1.2.в, приказана је типична принципска зависност снаге од ширине опсега која важи у пракси [2].

Компромис између кашњења и снаге (*Delay [DL]-Power [PW]*) разматра зависност снаге и кашњења које представља меру квалитета сервиса и блиско је везано за велики обим саобраћаја. У пракси, зависност кашњења од снаге одступа од просте монотоне криве. На слици 1.2.г, приказана је типична принципска зависност снаге од кашњења која важи у пракси [2].



Сл. 1.2 Приказ принципских зависности метрика за стандардизацију енергетске ефикасности.

На основу свега наведеног, може се закључити да оптимално решење за радну област енергетски ефикасног система треба тражити у пресеку супростављених захтева за енергетску ефикасност, спектралну ефикасност, трошкове, снагу, те ширину опсега и кашњење.

### 1.3.4. Преглед стања у области истраживања дисертације

Истраживања у области контроле снаге у циљу повећања капацитета се јављају још код раних аналогних ћелијских радио система. Велики број студија заснованих на симулацији различитих шема за контролу снаге, је још осамдесетих година прошлог века, указао на могућност повећавања капацитета у ћелијским радио системима [35,36]. Потом је уследио велики број теоријских студија, где је изведен модел са оптималном централизованом контролом снаге [37]. Развијени су централизовани и дистрибуирани алгоритми с континуалним нивоима снаге, усмереним ка оптимизацији односа  $C/I$ . Комплексност централизованих алгоритама у погледу захтеваних рачунарских ресурса их чини непрактичним за имплементацију у реалним системима. Последњих година је пажња усмерена ка имплементацији дистрибуираних алгоритама за контролу снаге. Све комерцијалне јавне радио мреже, укључујући и GSM, користе овакве шеме за контролу снаге, где је регулација снаге заснована на мерењима стања на појединачним радио линковима. Примена контроле снаге у комбинацији са другим функционалностима мреже је такође важна тема и предмет је даљих истраживања. Емитовање с прекидима је једна од техника која је у комбинацији са контролом снаге веома ефикасна у смањењу потрошње у мрежи. Алгоритми за приступ радио каналима су анализирани у [46], а дискретна дистрибуирана контрола снаге је проучавана у [47]. Већина ових студија је теоретског карактера јер се не односе на конкретан систем. Такође, већина ових алгоритама није усмерена толико на побољшање енергетске ефикасности, колико на повећање капацитета система.

Када се формулисао став о значају уштеде енергије, истраживања су кренула у смеру смањивања потрошње енергије на нивоу мреже тј. на протоколском нивоу. Предложен је нови приступ који урачунава утицај потрошње енергије зависне од саобраћајног оптерећења у мрежи. Применом технике *energy profile aware routing* могуће је остварити уштеду енергије од 35% са додатним смањењем оперативних трошкова [38]. Надаље се разматра анализа утицаја архитектуре мреже на уштеду енергије [5]. Вршена су и поређења различитих типова ћелија где је показано како је могуће остварити уштеду енергија коришћењем микро ћелија у мрежи, уколико саобраћај то дозвољава [6].

Показало се да је проблем енергетске ефикасности директно везан за смањење потрошње базних станица. Наиме, базне станице су кључни елемент за уштеду енергије услед њихове потрошње и релативно великог броја, при чему енергетска предимензионисаност базних станица условљава њихову потрошњу. Могућност искључивања неких базних станица у периодима малог саобраћајног интензитета представља ефикасну технику за смањење потрошње [4]. Даљу уштеду енергије је могуће остварити подешавањем функција базне станице у зависности од саобраћајног оптерећења [7]. Зависност потрошње енергије код базне станице у зависности од саобраћајног оптерећења је такође анализирана у [39], и добијени резултати су потврђени мерењима. Саобраћајно оптерећење је значајан фактор када се разматра потрошња, што показују и експериментални резултати да потрошња GSM и UMTS базних станица зависи од интензитета саобраћаја који опслужују [40]. Поређење потрошње GSM и UMTS базних станица, као и њихов утицај на окружење је дат у [41]. Јавила се потреба за методима брзе и поуздане предикције потрошње базних станица, што је условило развој различитих симулационих модела у оквиру мобилне мреже. Симулациони модел линка у GSM је предложен у [42]. Овом моделу је придодат и симулациони модел *downlink*-а у циљу побољшања квалитета и повећања капацитета система.

Осим смањења потрошње енергије, други битан фактор који се узима у разматрање је ниво поља који генерише базна станица, и утицај истог на здравље људи и животне средине. Опсежна мерења су спроведена у циљу утврђивања нивоа електромагнетног зрачења које генеришу базне станице [43]. Дефинисане су регулативе и прописи о нивоу дозвољеног зрачења и утицају истог на људе и животну средину [44, 45].

### *1.3.5. Значај симулационих модела базне станице за оптимизацију енергетске ефикасности*

Интуитивно је јасно да излазна снага GSM базне станице зависи од различитих чинилаца, попут густине корисника у ћелији, удаљености корисника од базне станице, слабљења сигнала (карактеристике простирања) и понашања корисника. У циљу ефикасне имплементације алгоритама за контролу снаге због

побољшања енергетске ефикасности код реалних система, неопходно је познавати расподелу излазне снаге базне станице. Моделирање ове зависности на бази поузданог симулационог модела је разматрано у оквиру истраживања везаног за ову докторску дисертацију.

Потрошња базне станице се може разложити на компоненту која не зависи од саобраћаја (поларизација електронских склопова, потрошња вентилатора/кулера и др.) и компоненту која зависи од саобраћаја

$$P(A) = P_0 + p(A), \quad (1.1)$$

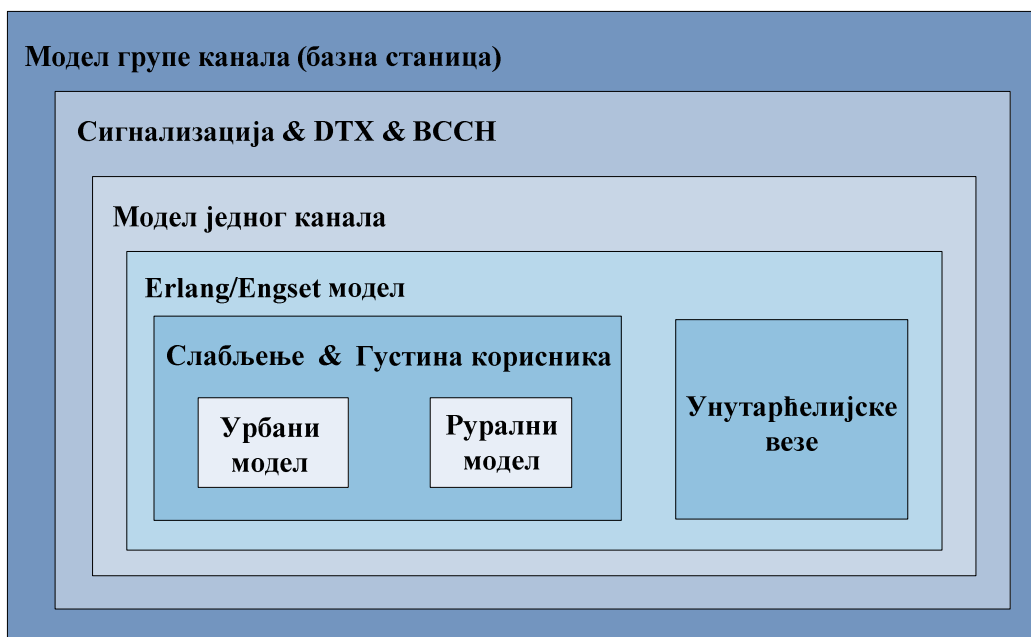
где  $P_0$  константан члан који описује потрошњу електронике у мирној радној тачки, потрошњу вентилатора итд., док је  $p(A)$  члан зависан од саобраћаја, такав да је  $p(0) = 0$ .

На данашњем степену развоја технологије је  $P_0 \gg \max(p(A))$ , а тежња је да се у будућности то промени. Централна тема дисертације је моделирање члана  $p(A)$ , па се стога само анализира део излазне снаге који зависи од саобраћаја. Иако је овај члан мањи, имплементацијом ефикасније опреме у базним станицама, константни члан ће постајати све мање доминантан. Ипак, када се узме број базних станица и њихова потрошња, лако се може уочити да се променљиви члан не може занемарити. Према томе, потрошња која зависи од интензитета саобраћаја је битан фактор код повећавања енергетске ефикасности.

У великом броју случајева одређивање расподеле излазне снаге базне станице није могуће решити аналитички или је, пак, пут до решења веома компликован. Поступак симулације је природно решење које може надоместити недостатак аналитичке формулације разматраног проблема. Такође, симулацијом је могуће проверити постојеће моделе као и њихово понашање под различитим условима. Симулација је моћан поступак којим се може проценити зависност излазне снаге базне станице од различитих чинилаца и тиме дефинисати ефикасна стратегија за уштеду енергије заснована на адаптацији режима рада GSM базне станице или читаве мреже, чиме се директно утиче на побољшање енергетске ефикасности мобилних мрежа.

## 1.4 Допринос дисертације

Циљ истраживања ове докторске дисертације је добијање аналитичких и симулационих поступака који ће омогућити прецизну и поуздану процену зависности излазне снаге базне станице од следећих чинилаца: интензитета саобраћаја, густине корисника у ћелији, слабљења сигнала и унутарћелијског саобраћаја. Други, не мање важан, циљ истраживања је развој модела који ће омогућити проверу добијених теоријских резултата. При формулисању модела примењује се дедуктивни приступ, где се полази од једноставног модела једног канала, за који се посматрају случајеви неограниченог и ограниченог броја корисника, различите густине корисника и различитих услова пропагације (слабљење сигнала), па се разматрање проширује на групу канала (базна станица) и на крају су обухваћени ВССН носилац, сигнализација и емитовање са прекидима (DTX). На слици 1.3 је дат приказ структуре модела разматраног у овој докторској дисертацији.



Сл. 1.3 Приказ структуре модела разматраног у дисертацији.

Посебан допринос представљају симулациони модели за процену вредности излазне снаге сложених модела GSM ћелије као што су: ћелија са



великим уделом унутарћелијског саобраћаја, ћелија са великим утицајем ограниченог броја извора саобраћаја и ћелија са сложеном зависношћу расподеле густине корисника. На основу развијених модела, могуће је проценити ефикасност појединих метода за уштеду енергије у GSM мрежи, као и дефинисање стратегија за увођење нових мера уштеде. Према томе, значај истраживања изражен је кроз нова сазнања о могућностима уштеде енергије у мобилним мрежама.

## 1.5 Организација излагања

У поглављу 2 су анализирана основна својства мобилних мрежа с посебним освртом на параметре GSM попут структуре канала, као и поступак управљања излазном снагом једне везе. Такође су анализирани утицаји удаљености мобилних и базних станица на емисиону снагу, утицај околине на слабљење сигнала, те густина мобилних станица у ћелији. Описана је појава унутарћелијских веза које се најчешће јављају у ретко насељеним областима и приватним мобилним мрежама.

У поглављу 3 је дата основа теорије телекомуникационог саобраћаја с акцентом стављеним на његова основна статистичка својства. Дефинисани су понуђени саобраћај, опслужени саобраћај, изгубљени саобраћај, губици по времену, губици позива, итд. Описани су процеси долазака позива и процеси опслуживања у мрежи која се проучава у овом истраживању. Анализиран је модел савршеног саобраћајног снопа, као и модели с губицима (*Erlang*-ов и *Engset*-ов модел). Поменути су и модели с мултидимензионалним саобраћајним процесима.

У поглављу 4 се разматрају основни поступци симулације телекомуникационог саобраћаја. Уводи се метод *Monte Carlo*, појам случајног броја, генерисање и прекидање везе, анализа појма времена и генерисање случајних удаљености између мобилне и базне станице. Потом су приказани методи за обрада резултата симулације. На крају је дат преглед постојећих симулатора за мобилне мреже.

У поглављу 5 је извршен прорачун снаге једног канала базне станице, где су израчунате средња вредност, густина и функција расподеле вероватноће снаге једног канала. Разматрана је зависност снаге једног канала од слабљења сигнала и густине корисника. Потом је приказан поступак прорачуна својстава излазне снаге групе саобраћајних канала у ћелији. Разматрају се својства средње излазне снаге базне станице. Прорачунат је утицај слабљења сигнала и густине корисника у ћелији на емисиону снагу базне станице. На крају је анализиран утицај унутарћелијског саобраћаја и ограниченог броја корисника на емисиону снагу базне станице.

У поглављу 6 су представљени симулациони модели базне станице. У првом кораку је уведен симулациони модел једног канала базне станице и приказани су резултати симулације (средња снага, густина вероватноће и функција расподеле вероватноће снаге) за један канал. Потом је извршена симулација модела групе канала односно базне станице при чему су посматране средња снага, густина вероватноће и функција расподеле вероватноће снаге. У оквиру модела групе канала, урачунати су и утицаји сигнализације, ВССН носиоца и емитовања са прекидима. Приказани су резултати симулације за групу канала у зависности од густине корисника и слабљења сигнала. Потом су приказани резултати симулација за групу канала у зависности од унутарћелијског саобраћаја и ограниченог броја корисника. Приказани су и сложени модели који обухватају претходно наведене случајеве, а за које није једноставно добити аналитичко решење. Резултати симулације су статистички обрађивани, тако да задовољавају 95% интервал поверења.

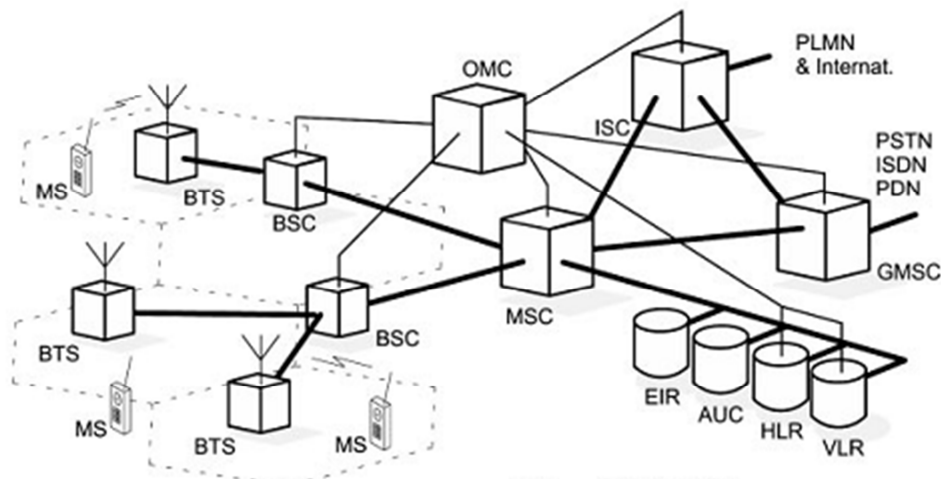
У поглављу 7 су анализирани и дискутовани резултати добијени аналитичким и симулационим поступцима у погледу енергетске ефикасности. Дати су могући приступи за уштеду енергије у мобилним мрежама.

У поглављу 8 дата су закључна разматрања и смернице за даљи рад.

## **2. Основи GSM мреже**

## 2.1 Архитектура GSM мреже

Скраћеница GSM (*Global System for Mobile communication*) означава светску дигиталну мрежу мобилних телефона. Ова скраћеница је преузета од радне групе Европског удружења пошта и телекомуникација (*Groupe Spécial Mobile*), чији је рад усмерен на развој мобилних комуникација. Технологија GSM се често означава као технологија друге генерације (2G) мобилних мрежа, за разлику од прве генерације која је била заснована на аналогној техници и треће генерације (3G) засноване на новим техникама са већим избором сервиса (пренос података, велики протоци, видео-телефонија, итд). Основна својства GSM мреже су дата сагласно изворима [48, 49]. На слици 2.1 приказана је основна архитектура GSM мреже.



Сл. 2.1 Основна архитектура GSM мреже [49].

Са слике се могу уочити три основна дела у мрежи мобилне телефоније: мобилна станица (телефон), подсистем базне станице и мрежни подсистем.

Мобилна станица (*Mobile Station, MS*) се састоји од мобилног терминала и претплатничког идентификационог дела (*Subscriber Identity Module, SIM*). SIM је јединица која носи све податке о кориснику: бројеве идентификације, кључеве и алгоритме шифровања идентитета корисника и корисничких информација, права корисника на услуге, корисничку базу података и податке о наплати разговора. У комбинацији са SIM-ом, мобилни терминал омогућује двосмерну радио везу.

Подсистем базне станице (*Base Station Subsystem, BSS*) се састоји од примопредајне јединице (*Base Transceiver Station, BTS*), управљачке јединице (*Base Station Controller, BSC*) и јединице за трансковање и прилагођење протока (*Transcoding and Rate Adaptation Unit, TRAU*).

Мрежни подсистем (*Network SubSystem, NSS*) се састоји од комутационог центра (*Mobie Switching Center, MSC*), регистра домаћих корисника (*Home Location Register, HLR*), регистра гостујућих корисника (*Visitor Location Register, VLR*), регистра идентитета мобилних уређаја (*Equipment Identity Register, EIR*), центра за проверу (*Authentication Center, AUC*) и пролаза (*Gateway*) за везе са другим мрежама.

У наставку су детаљније објашњене поједине компоненте система, у мери у којој је то неопходно у овом истраживању.

- **BTS** - примопредајна јединица за одржавање радио везе између мобилног телефона и мреже у једној ћелији. Преко радио везе која се остварује бежичним путем, преносе се и кориснички подаци и сигнализација. Базној станици је придружена група фреквенцијских канала који се користе у једној ћелији.
- **BSC** – јединица подсистема базне станице која управља везама. Једна BSC може да контролише неколико BTS, а комуникација између њих је реализована *Abis* интерфејсом.
- **TRAU** – јединица подсистема базне станице задужена за компресију и декомпресију говорних сигнала између мобилног телефона и комутационог центра.
- **MSC** – комутациони центар у мрежи мобилне телефоније преко кога је повезан велики број подсистема базних станица (преко *A* интерфејса). Главна улога му је преспајање говорних сигнала (упућивање позива, остварење везе, обезбеђивање корисничких функција) уз то да мора да се води рачуна о тренутном положају корисника. Преко MSC се такође врши повезивање корисника мобилне мреже са корисницима других мрежа. Свака мрежа мобилне телефоније мора имати бар један MSC.

- **HLR** – база података свих корисника једне мреже мобилне телефоније. Кориснички подаци могу бити стални (позивни број, скуп расположивих сервиса) и привремени (тренутна локација).
- **VLR** – база података корисника који су у надлежности једног комутационог центра (сваки MSC има бар један VLR). Промена положаја мобилне станице ка другом MSC се види на основу промена података у VLR, па преко њих и у HLR. Запис о претплатнику у HLR-у садржим податке о VLR-у у чијој је надлежности корисник.
- **EIR** – база података о мобилним терминалима који се користе у мрежи. На овај начин је могуће открити коришћење украденог мобилног телефона.
- **AUC** – део HLR-а задужен за проверу исправности корисника и чувања приватности.
- **BSIC** (*Base Station Identity Code*) – ознака базне станице која се периодично емитује преко синхро канала сваке базне станице.

Да би се увод о архитектури GSM мреже заокружио у логичку целину, битно је увести и појмове попут ћелије, локацијске области, *handover*-а.

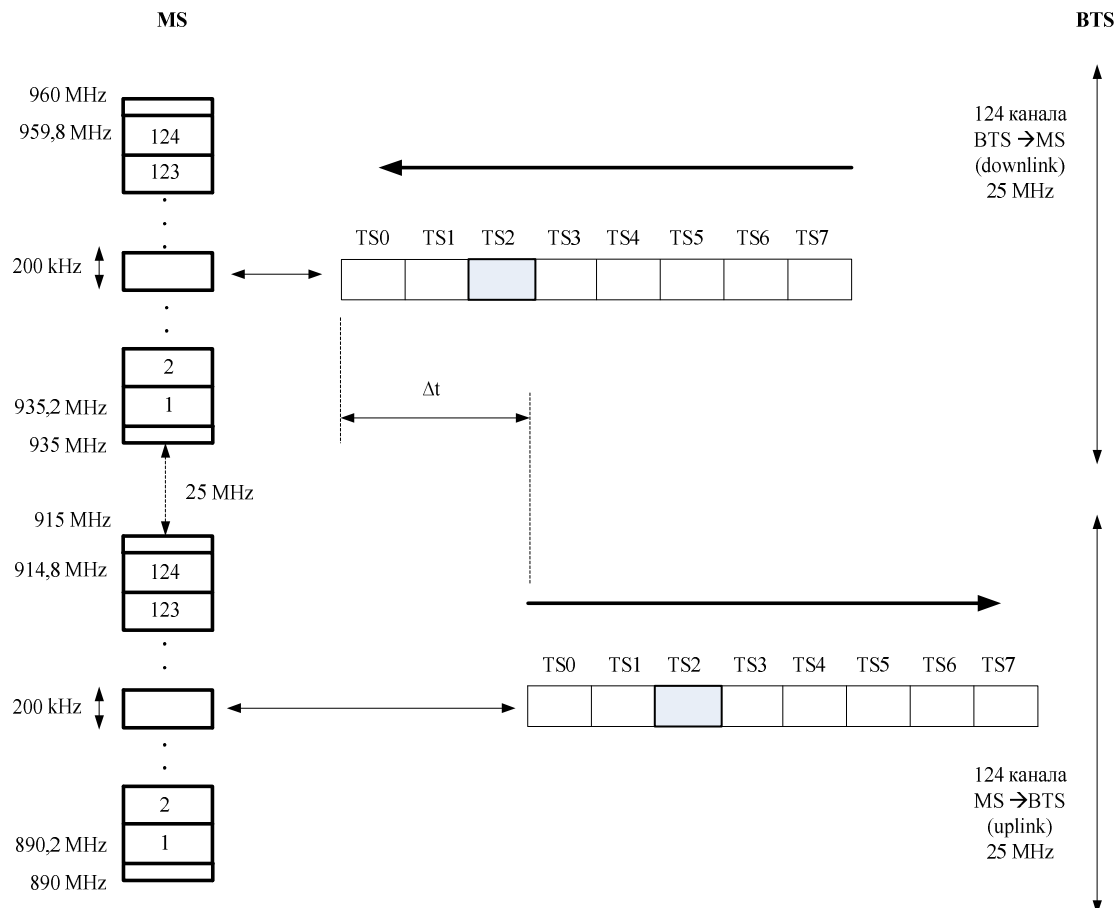
Ћелија је основни део GSM мреже који је прокривен једном базном станицом (BTS).

GSM локацијска област (*Location Area*) је најчешће група суседних ћелија. У случају долазног позива је згодно да се тражење позваног корисника врши у само једном делу мреже. Тај део се зове област, и у случају тражења корисника сигнална порука *PAGING* се шаље само ћелијама у тој области.

*Handover* или преуређење везе је поступак промене ресурса (саобраћајних и сигнализационих) помоћу којих се одржава веза мобилне станице која прелази из једне ћелије у другу. Најбитнији услов је да корисник не осети ову промену.

## 2.2 Врсте и расподела канала у GSM

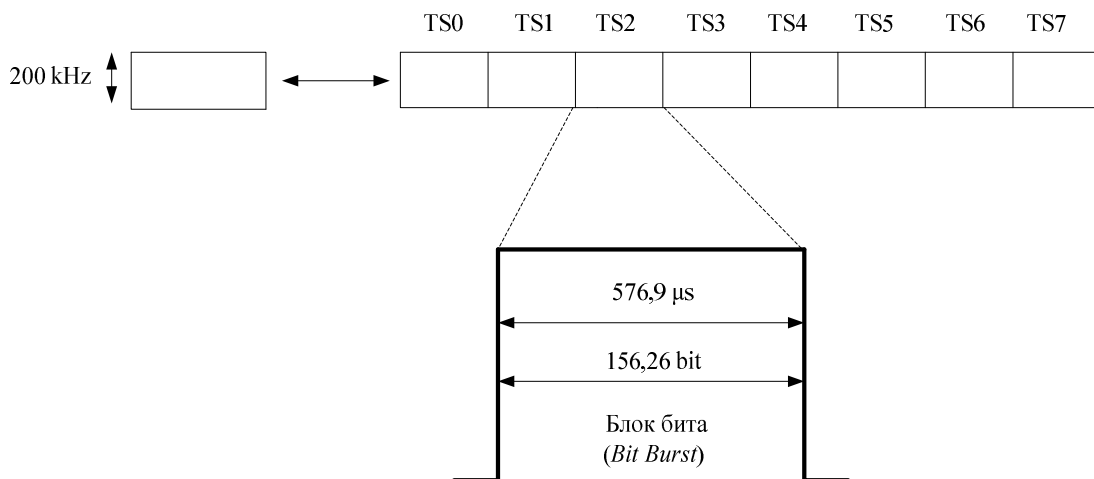
У GSM мрежи постоји подела фреквенцијског опсега на два подопсега по смеровима, један за смер од мобилне ка базној станици, а други за супротан смер. Сваки од подопсега се дели на фреквенцијске канале. На слици 2.2 је приказана подела фреквенцијског опсега за GSM мрежу.



Сл. 2.2 Подела фреквенцијског опсега у GSM мрежи.

Опсег 890-915 MHz је предвиђен за пренос од мобилних ка базним станицама, MS → BTS, тзв. *uplink*. Опсег 935-960 MHz је предвиђен за пренос од базних ка мобилним станицама, BTS → MS, тзв. *downlink*. Оба подопсега су подељена на по 124 фреквенцијска канала ширине 200 kHz који су сукцесивно нумерисани. Одређени скуп фреквенцијских канала за пријем и предају се додељује ћелији (*Cell Allocation, CA*). Један фреквенцијски канал је резервисан за

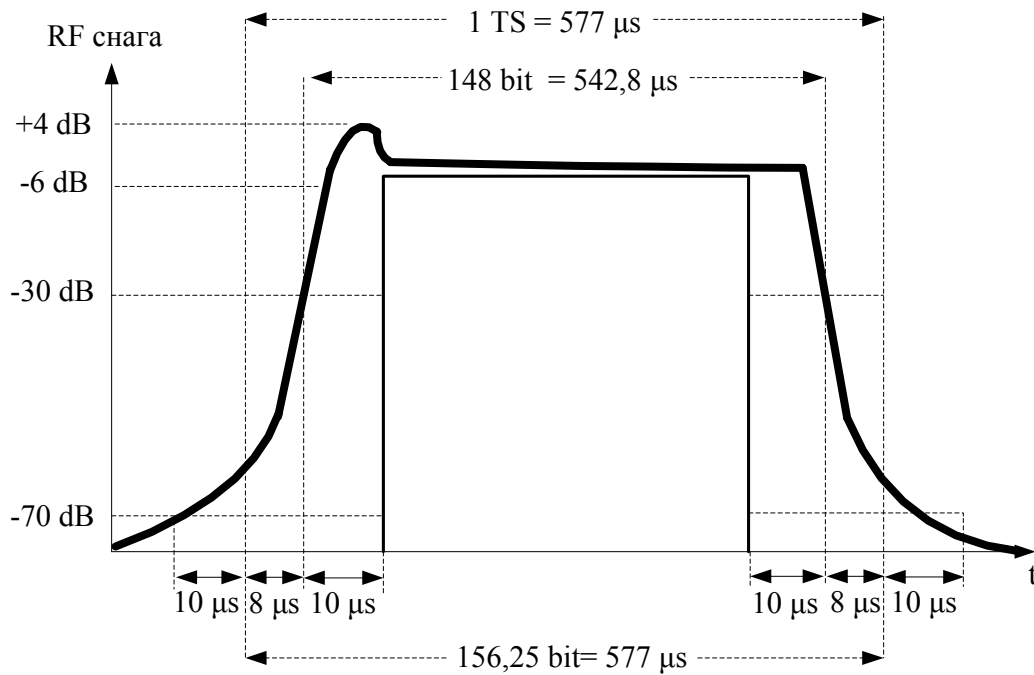
синхронизацију података од базне станице ка мобилним станицама. Тај канал се назива носилац синхронизације односно *BCCH Carrier (Broadcast Channel, BCCH)*. Између *uplink*-а и *downlink*-а се налази опсег од 25 MHz. На сваки фреквенцијски канал је примењено мултиплексирање по времену (*Time Division Multiple Access, TDMA*). То значи да је један канал садржи 8 временских канала који се често називају временски одсечци (*Time Slot*). Скуп од 8 временских канала се назива рам или фрејм (*frame*). Предаја и пријем једне везе се обавља временским каналима истог редног броја. Битно је напоменути да пријемни временски канали касне за одговарајућим предајним временским каналима за величину времена преноса. Ово се ради да би се омогућило коришћење истог хардвера за пријем и предају (пријем и предаја никад нису истовремени због кашњења временских пријемних у односу на предајне канале) што знатно снижава цену и димензије мобилног терминала. Подаци који се преносе временским каналом се називају блокови бита (*bit burst*). Блок бита траје 576,9  $\mu$ s и обухвата 156,25 битских интервала. На слици 2.3 је приказан блок бита који се преноси преко временских канала.



Сл. 2.3 Блок бита за пренос преко временског канала.

Релативна расподела снаге сигнала који носи блок бита (кориснички саобраћај или сигнализацију) је приказана на слици 2.4.





Сл. 2.4 Релативна расподела снаге сигнала који носи блок бита.

Постоји пет врста блокова бита: нормални, за поправку учестаности, синхронизациони, за попуну и приступни. Низ блокова бита исте врсте се назива каналом. Низ нормалних блокова који носе корисничке податке се зову саобраћајни канал (*Traffic CHannel*, TCH), и у овом раду су најзначајнији.

- Нормални блок бита (*Normal Burst*) служи за пренос корисничког саобраћаја (говор, подаци) и сигнализације у оба смера ( $MS \rightarrow BTS$ ,  $BTS \rightarrow MS$ ). Делови овог блока могу да се користе за пренос брзе сигнализације код *handover*-а када корисник прелази из једне ћелије у другу. Помоћу нормалног блока могу да се пренесу све сигналне поруке осим почетне сигналне поруке коју шаље мобилна станица и једне поруке у процесу *handover*-а. На крају блока је заштитни временски интервал (*guard period*) трајања 8,25 битских интервала за потребе временског раздвајања скупова података или сигнала.
- Блок за поправку учестаности (*Frequency correction Burst*) преноси се само у смеру од базне ка мобилној станици. Служи за подешавање учестаности мобилне станице. Узастопно понављање овог блока се назива каналом за подешавање учестаности FCCN (*Frequency Correction CHannel*).

- Синхронизациони блок (*Synchronization Burst*) је сличан нормалном блоку са већим испитним низом и мањим бројем бита за корисничке садржаје. Овај блок се шаље од базне станице ка мобилним станицама. Синхронизационим блоком се преносе идентификатор базне станице (BSIC) и редни број текућег рама, односно синхронизује се мобилна станица у односу на базну станицу у чијој је надлежности. Испитни синхро низ је исти за све базне станице једне мреже, што омогућује да мобилна станица открива све базне станице које раде на истој учестаности а не припадају тој мрежи.
- Приступни блок (*Access Burst*) шаље се од мобилне станице ка базној у случају успостављања везе и потврђивања *handover*-а. Има мали број бита за податке и велики број бита за размак (*guard period*). Испитни синхро низ је различит за сваку ћелију и користи се на пријему код одређивања којој је базној станици овај блок упућен. Овај блок бита има већи размак од осталих блокова да би се спречило временско преклапање узастопних блокова на пријему у BTS. У успостављеној комуникацији, мобилна станица шаље блокове бита у тренутку који обезбеђује да стигну у право време у BTS, урачунавајући и време простирања. Пошто се приступни блок бита шаље у тренутку када мобилна станица нема податке о удаљености од BTS, приступни блок бита (кратког трајања) ће се на пријему завршити пре започињања пријема следећег блока од неке ближе мобилне станице, односно неће бити преклапања. У случају када мобилна станица “зна” удаљеност од BTS, она шаље блок раније, за тачно одређен временски интервал (*Timing Advance*, TA), да би на пријему блок бита стигао у свом временском прозору. Укупно кашњење овог блока је увећано за двоструко време простирања на растојању једнаком удаљености између мобилне и базне станице. То значи да би временски канал стигао на пријем у свом прозору, мора бити послат раније за  $TA = 2T_p$ , где је  $T_p$  време пропагације сигнала од мобилне до базне станице. Стога се TA одређује на основу резултата мерења у BTS, потом се одређује време преноса које се удвостручује. У току разговора, одређивање TA се врши мерењем положаја испитног низа у нормалном блоку. Величина TA не може да узима произвољне вредности (због синхронизације предаје и пријема) већ целобројне вредности времена трајања једног бита, око 3,7  $\mu$ s.

Ово је време потребно да сигнал пређе 1100 m и одговара удаљености од око 550 m између MS и BTS. Опсег промене вредности TA има 64 корака при чему један корак одговара времену трајања једног бита или удаљености од 550 m. Први корак има вредност нула ( $TA = 0$ ) и он се користи за мобилне станице на малој удаљености од BTS. Удаљавањем MS од BTS, повећава се корак промене TA и достиже се највећа вредност 63 која одговара времену од  $TA = 63 \times 3,7 \mu s$  и удаљености од 74 km ( $2 \times 37$  km). Стога је јасно да промена TA до 63 корака покрива ћелије чији је полупречник до 37 km. Вредност TA се преноси у SACCH каналу (табела 2.1): у смеру BTS→MS вредност коју треба користити а у смеру MS→BTS вредност коју MS тренутно користи. Поступак сталног утврђивања вредности TA се назива подешавајућа синхронизација рама (*adaptive frame alignment*).

- Блок за попуну (*Dummy Burst*) шаље се по једној учестаности у једној ћелији (BSCN carrier) и то када нема других блокова за слање. Овај блок има посебан испитни низ. Користи се код укључења мобилне станице. Мобилна станица на основу снаге сигнала блокова за попуну различитих ћелија одлучује која јој је ћелија најближа, односно преко које ће се остварити даља комуникација. Такође, за мобилне станице које су у вези, мерење снаге сигнала појединих BSCN носилаца је начин да се утврди потреба *handover*-а.

У општем случају, временски канали којима се врши пренос између базне и мобилне станице се зову физички канали. Одређени су својим бројем у раму ( $TSn$ ,  $n = 0,1,\dots,7$ ) и редним бројем рама. Стога се може рећи да је физички канал временски канал у једном фреквенцијском каналу који носи блок бита. Логички канал је скуп физичких канала који следе унапред утврђени редослед и којима се преноси иста врста информације. Логички канали између мобилне и базне станице се деле на сигнализационе (канале за управљање, CCH, *Control CHannel*) и саобраћајне канале (TCH, *Traffic CHannel*).

Сигнализациони канали се могу поделити према сигнаlima које преносе у три групе: сигнали које емитује BTS за подешавање и усклађивање рада мобилних станица са BTS (једносмерни канали BTS→MS), сигнали који претходе вези

(једносмерни канали), сигнали за остваривање веза (двосмерни канали). Подела сигнализационих канала је приказана у табели 2.1.

Табела 2.1 Подела сигнализационих канала.

<i>Група</i>	<i>Сигнализациони канал</i>	<i>Функција</i>	<i>Смер</i>
За емисију ( <i>Broadcast Channel, BCH</i> ) (једносмерни)	<i>Broadcast Control CHannel (BCCH)</i>	Управљање емисијом	<b>MS ← BTS</b>
	<i>Frequency Correction CHannel (FCCH)</i>	Подешавање учестаности	<b>MS ← BTS</b>
	<i>Synchronization CHannel (SCH)</i>	Подешавање <i>MS</i> и <i>BTS</i>	<b>MS ← BTS</b>
За управљање ( <i>Common Control Channel, CCCH</i> ) (једносмерни)	<i>Random Access CHannel (RACH)</i>	Приступ без чекања	<b>MS → BTS</b>
	<i>Access Grant CHannel (AGCH)</i>	Дозвољен приступ	<b>MS ← BTS</b>
	<i>Paging CHannel (PCH)</i>	Позивање	<b>MS ← BTS</b>
	<i>Notification CHannel (NCH)</i>	Најава	<b>MS ← BTS</b>
Наменски за управљање ( <i>Dedicated Control Channel, DCCH</i> ) (двосмерни)	<i>Stand alone Dedicated Control CHannel (SDCCH)</i>	Самостални наменски	<b>MS ↔ BTS</b>
	<i>Slow Associated Control CHannel (SACCH)</i>	Спори придружени	<b>MS ↔ BTS</b>
	<i>Fast Associated Control CHannel (FACCH)</i>	Брзи придружени	<b>MS ↔ BTS</b>

Сигнализациони канали за емисију (*BCH*) користе временски канал *TS0* једног фреквенцијског канала додељеног ћелији. Овај фреквенцијски канал се зове *BCCH* носилац и користи нормални блок бита. Канал за управљање емисијом (*BCCH*) је једносмерни канал (*BTS → MS*) којим се од *BTS* ка свим мобилним станицама шаљу подаци о организацији ћелије и мреже у суседству посматране

ћелије. Ови подаци се односе на број и учестаност радио канала у ћелији, односно на синхронизацију (редни број рама). Другу групу канала за емисију чине канали за контролу учестаности (FCCH). То су једносмерни канали (BTS → MS) за преношење информација о подешавању учестаности у мобилним станицама. Информације се преносе блоком бита за подешавање учестаности. Трећу групу канала за емисију чине канали за синхронизацију (SCH). Ово су једносмерни канали (BTS → MS) за пренос идентификационих података о BTS и синхронизационе податке о рамовима који омогућавају одређивање редног броја рама. Информације се преносе синхронизационим блоком бита.

Сигнализациони канали за управљање (CCCH) користе временски канал TS0 једног фреквенцијског канала додељеног ћелији, ако је довољно. Ако се јави потреба, ови канали се могу преносити и у временским каналима TS2, TS4 и TS6 фреквенцијског канала. У прву групу ових канала убрајају се канали за случајни приступ (RACH). То су једносмерни канали (MS → BTS). Мобилна станица захтева брзу услугу од базе станице за додељивање наменског сигнализационог канала. Зато се овај захтев прима директно без стављања на чекање. Овај канал се користи на почетку везе а врло кратке информације се преносе приступним блоком бита. У другу групу се сврставају канали за потврду (AGCH). То су једносмерни канали (BTS → MS) за потврду да је мобилној станици додељен наменски сигнализациони канал (SDCCH) или саобраћајни канал (TCH). У трећу групу се сврставају канали за позивање (PCH). Ово су једносмерни канали (BTS → MS) за налажење одређене мобилне станице у ћелији. У четвртој групи се налазе канали за најаву (NCH). Ово су једносмерни канали (BTS → MS) за слање података мобилној станици о долазној сигналној поруци или подацима.

Сигнализациони наменски канали за управљање (DCCH) су двосмерни канали који се преносе у временским каналима TS0 и TS1. У прву групу спада самостални наменски сигнализациони канал (SDCCH). Он се добија преко RACH канала (MS → BTS) и потврде преко AGCH (BTS → MS). Овај канал се ослобађа после употребе. Користи се код успоставе телефонске везе, када још не постоји додељени саобраћајни канал. У другу групу спада спори придружени сигнализациони канал (SACCH). Овај канал се придружује свакој вези односно каналу SDCCH (сигнална веза) или TCH каналу (саобраћајна веза) и користи се за

пренос информација о радио преносу, о управљању емисионом снагом и о резултатима мерења говорног сигнала. Овај канал мора да постоји све време везе, јер се пријем података по њему узима за потврду постојања корисничке везе. Овај канал заузима одређена места у распореду рамова тако да није могуће да се користи непосредно по потреби. У трећу групу спадају брзи придружени сигнализациони канали (FACCH). Овај канал се користи када је потребно брзо слање података за већ остварену везу. Тада се у говорним блоковима бита део бита одваја за њега.

За пренос у саобраћајним каналима се користе само нормални блокови бита. Говор може да се преноси пуним битским протоком (*full rate*, 13 kb/s) или половином битског протока (*half rate*, око 6,5 kb/s). Подаци се преносе протоцима од 3,6 kb/s до 14,5 kb/s.

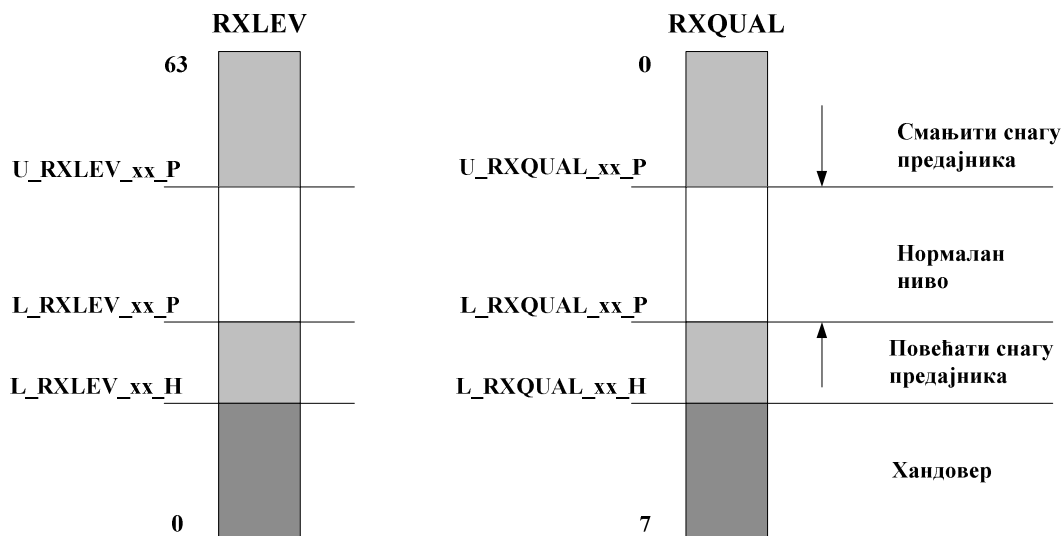
Припадност физичких канала појединим логичким каналима је одређена положајем, односно местом у мултиплексу. У општем случају, распоред логичких канала је променљив. Ово не важи за синхронизационе канале. У случају када се мобилна станица синхронизује са BTS, сигналним порукама се може послати распоред сигнализационих логичких канала свим мобилним станицама. Организација логичких канала има четири слоја. Основни је рам (фрејм, *frame*) који се састоји од 8 временских канала, TS0,...TS7.

### 2.3 Функционалности радио интерфејса и контрола снаге

Радио интерфејс је описан скупом функција међу којима је једна од најбитнијих функција контроле радио линка. Главна својства ове функције су мерење квалитета примљеног сигнала за избор ћелија и припрема за *handover*. Мерење сигнала на каналима и контрола снаге служе за оптимизацију радио канала. На основу измерених вредности нивоа и квалитета сигнала на *downlink*-у (DL) и *uplink*-у (UL), врши се динамичка контрола снаге (*Transmitter Power Control*), као једна од најзначајнијих функционалности радио интерфејса. Сврха динамичке контроле снаге је минимизација интерференције и смањење потрошње

мобилних и базних станица. Такође, контрола снаге омогућава избегавање непотребних *handover*-а и сигнализације у мрежи.

Контролне функције линка се врше преко SACCH канала. Мерење у саобраћајним каналима се врши да би се омогућило управљање емисионом снагом у базној и мобилној станици. Контрола снаге се заснива на мерењу RXLEV и RXQUAL параметара, за које су дефинисане минималне и максималне вредности, посебно за DL, посебно за UL. У ту сврху дефинишу се параметри P и N, односно снага и број узастопних израчунатих средњих вредности које су изнад или испод дефинисаних прагова, када базна станица модификује излазну снагу мобилне или базне станице. Подаци мерења снаге се периодично примају сваких 480 ms и рачуна се средња вредност. Резултати мерења се потом прослеђују блоку за контролу емисионе снаге да би се прилагодила снага мобилних и базних станица новим ситуацијама. У општем случају, контрола снаге мобилне станице је обавезна, а базне станице је опциона. На слици 2.5, приказан је дијаграм граничних вредности параметара RXLEV и RXQUAL за које се врши прилагођење предајне снаге.

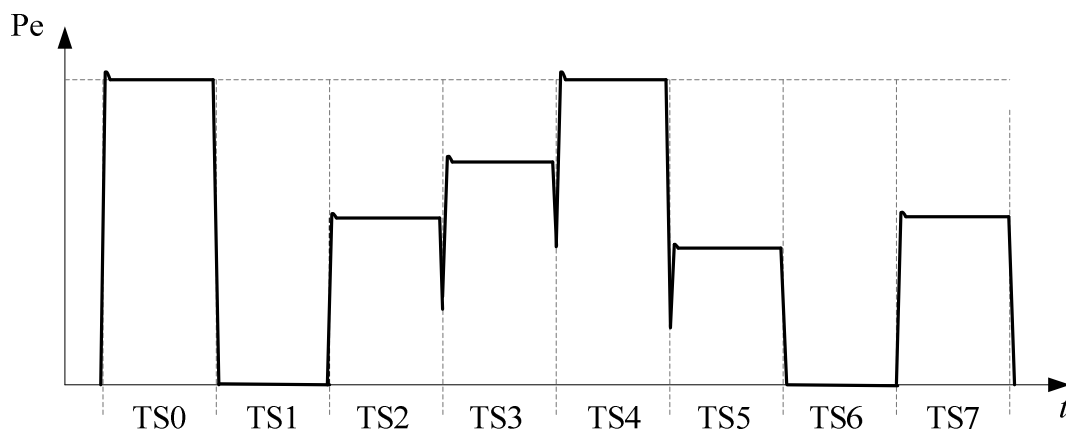


Сл. 2.5 Дијаграм граничних вредности параметара RXLEV и RXQUAL на основу који се прилагођава предајна снага.

Циљ контроле снаге на *uplink*-у је ограничавање снаге мобилне станице на минимално потребну да би базна станица примала сигнал од различитих мобилних станица на приближно истом нивоу. Тиме се смањује утицај интерференције на пренос саобраћајним каналима. Код мобилних станица,

управљање снагом продужава трајање батерије. Пошто се измери снага саобраћајног канала у мобилној станици, резултати мерења се шаљу управљачком делу подсистема базне станице, BSC. На основу ових резултата BSC шаље сигналну поруку о промени емисионе снаге базне станице, BTS. Такође важи и супротан сценарио, где на основу резултата мерења снаге саобраћајних канала у базној станици, BSC шаље сигналну поруку о промени емисионе снаге мобилне станице. Стога је дефинисано 16 степени контроле у ту сврху. Емисиона снага мобилне станице је у опсегу од 5 dBm до 33 dBm (класа 4, видети табелу 2.2), а пријемна од -110 dBm до -48 dBm.

На слици 2.6 је приказан пример расподеле емисионе снаге по саобраћајним каналима на једној учестаности. Пошто су резултати мерења снаге сигнала у мобилним станицама које користе временске одсечке TS0, TS1, TS2, TS4, TS6 и TS7 у почетку комуникације били различити и достављени BSC-у, BSC је послао поруке о промени емисионе снаге базних станица за сваки временски канал појединачно. Стога је емисиона снага у појединим временским каналима промењена па је у пријемницима мобилних станица постигнут приближно исти ниво снаге.



Сл. 2.6 Пример расподеле снаге по каналима.

Динамичка контрола снаге се примењује за сваки временски слот базне станице изузев BCCH носиоца који увек има константан, максимални ниво. Постоји тачно један BCCH канал по базној станици, који се преноси у временском слоту TS0 на учестаности BCCH носиоца. У слотовима TS1, TS2, TS3 BCCH носиоца, преноси се сигнализација (SDCCH, CCCH, PCH). Остатак временских



слотова се могу користити за пренос корисничког саобраћаја. У случају да у датом тренутку нема корисничког саобраћаја, у празне слотове се уноси *dummy burst*, кодован предефинисаном псеудослучајном секвенцом бита. По укључењу, мобилна станица проверава нивое снага ВССН носилаца у околним ћелијама, да би изабрала једну од суседних ћелија као сервисну. Такође, када је мобилна станица активна, ниво снаге ВССН носиоца из суседних ћелија служи као основа за могућу одлуку о *handover*-у.

Из свега наведеног је јасно да је снагу саобраћајних канала пожељно мењати, за разлику од снаге ВССН канала и осталих канала на ВССН носиоцу. Разлог лежи у томе да снага у ВССН каналу мора бити константна (референтни канал) да би се вршила упоредна мерења суседних ВССН канала од стране мобилне станице и на основу тога изабрала ћелија. Снага саобраћајних канала може да се мења у опсегу око 30 dB за смер BTS → MS, а 20 dB до 30 dB за смер MS → BTS. За потребе класификације мобилних и базних станица уводе се класе снага. Контрола излазне снаге мобилних станица се врши у корацама од 2 dB. Излазна снага базних станица се такође може подешавати у дискретним корацама од 2 dB, што је значајно за овај рад. У табели 2.2 је дат преглед класа снаге мобилних и базних станица.

Табела 2.2 Класе снаге у GSM.

Класа	<i>GSM900</i>		<i>GSM1800</i>	
	Мобилна станица	Базна станица	Мобилна станица	Базна станица
1	20 W	320 W	1 W	20 W
2	8 W	160 W	0,25 W	10 W
3	5 W	80 W	4W	5 W
4	2 W	40 W	-	2,5 W
5	0,8 W	20 W	-	-
6	-	10 W	-	-
7	-	5 W	-	-
8	-	2,5 W	-	-

Једна од битних функционалности радио интерфејса је и могућност примене DTX (*Discontinuous Transmission*) метода, односно емитовања с прекидима. Основна идеја је да постоји емитовање снаге само када мобилни претплатници причају. DTX метод доприноси да за време паузе у говору не буде емитовања носиоца ТСН канала у трајању једног временског слота, као и да се ово понавља за све време трајања паузе у говору, чиме се ефективно штеди енергија током пауза у говору. Хардверски ресурси за омогућавање DTX функционалности су засновани на детекцији говорне активности (*Voice Activity Detection*). Може се сматрати да око 40% времена постоји говорна активност у току разговора ( $DTX_{factor} = 0,4$ ) [50], што имплицира да има доста простора за уштеду енергије на бази ослобађања ТСН канала у периоду када говорна активност не постоји.

Фреквенцијско скакање спада у једну од техника за смањивање интерференције у мрежи. Основна идеја је да свака мобилна станица шаље TDMA фрејмове у зависности од секвенци фреквенција које су дефинисане алгоритмом фреквенцијског скакања. Мобилна станица шаље на фиксној фреквенцији током једног временског слота и потом скаче на другу фреквенцију пре следећег TDMA фрејма. Фреквенције на UL и DL су дуплекс фреквенције.

## **2.4 Утицај удаљености мобилног корисника и базне станице на снагу**

Пренос сигнала у мрежи мобилне телефоније се врши радио путем (бежично) такозваним *Air-interface*-ом. Ова врста преноса омогућава основни постулат концепције мрежа мобилне телефоније, мобилност корисника. Овај интерфејс је направљен да омогући пренос сигнализације без грешке, што квалитетнији пренос говора, да заштити приватност разговора и, наравно, мобилност корисника. Овим интерфејсом се преносе говор, подаци и сигнализација. У општем случају, сигнализацијом се преносе поруке о успостави везе, подаци о мрежи, подаци о расположивим ресурсима, подаци о синхронизацији и подаци о положају мобилног корисника. У систему мобилне телефоније својства радио преноса која су посебно битна су: зависност пријемне

снаге од удаљености предајника, утицај реалне околине на слабљење пријемног сигнала, зависност пријемне снаге од учестаности и вишеструкост путева преноса радио сигнала између предајника и пријемника (*multipath*).

У реалним условима, опадање пријемне снаге  $P_{pr}$  с удаљеношћу од предајника,  $L$ , дато је изразом:

$$P_{pr} \sim L^{-\gamma}, \quad (2.1)$$

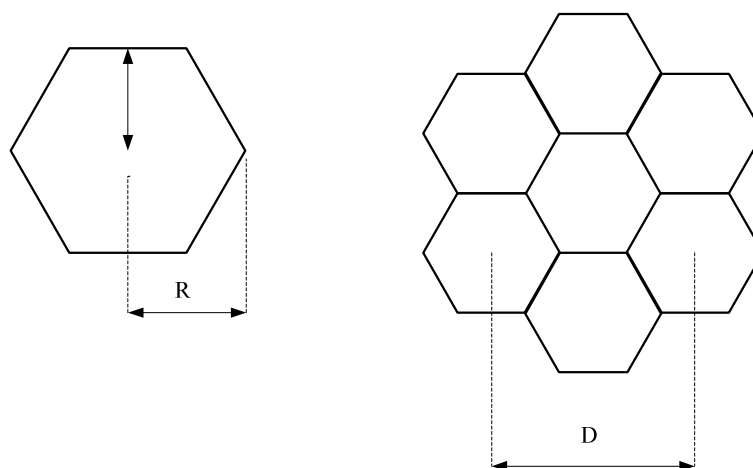
где је  $2 \leq \gamma \leq 5$ .

Чинилац  $\gamma$  показује утицај околине на слабљење радио сигнала. Зависност слабљења сигнала од учестаности се може апроксимирати обрнуто сразмерном зависношћу:

$$A \sim f^{-1}. \quad (2.2)$$

## 2.5 Ћелијска структура мреже

Као што је већ речено у уводном поглављу о GSM мрежи, ћелија је основна јединица у мобилним радио системима. Ћелија у идеалној представи узима облик правилног шестоугаоника, што је приказано на слици 2.7. У ћелијској представи мреже мобилних система, сматра се да је у центру ћелије базна станица која ћелију покрива радио сигналом.



Сл. 2.7 Ћелијска структура мреже.

Постоји више разлога за ћелијску организацију мрежа међу којима су:

- Расположиви опсег учестаности није довољан за све кориснике мреже,
- Расположиви опсег учестаности се дели на подопсеге,
- Подопсези се користе у ћелији,
- Мрежа се дели на ћелије,
- У суседним ћелијама не могу се користити исти подопсези учестаности,
- У довољно удаљеним ћелијама се могу користити исти подопсези учестаности,
- Потребну удаљеност ћелија које користе исте учестаности могуће је израчунати.

Основна особина једне радио ћелије је дужина већег полупречника,  $R$ , а основна особина односа ћелија је дужина растојања између центара појединих ћелија које користе исте учестаности,  $D$ . Растојање  $D$  се назива растојањем поновне употребе учестаности (*frequency reuse distance*).

Минимална вредност односа сигнал-интерференција која се дозвољава у мрежама мобилне телефоније износи 18 dB. То значи да користан сигнал мора да буде  $CIR \geq 63,1$  пута већи од сигнала сметње.

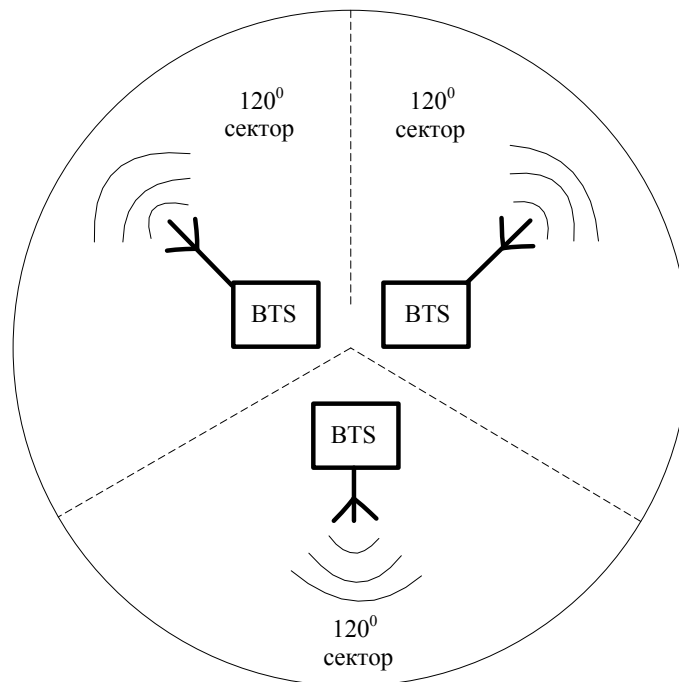
Минималан однос растојања  $D$  и полупречника  $R$  потребан да се задовољи однос сигнал-сметња у идеалним условима ( $\gamma = 2$ ) је:

$$\frac{D}{R} \geq 19,5. \quad (2.3)$$

Кластер (*Cluster*) је група ћелија које користе опсег учестаности који је додељен некој мрежи мобилне телефоније. Свакој од ћелија које чине кластер се додељује број. Понављањем кластера се гради мрежа, а битно је напоменути да ћелије са истим бројем никад нису суседне.

У стварности ћелије имају неправилне облике који су одређени површинском густином броја корисника (градска средина - већа густина - мање ћелије) и конфигурацијом терена који утиче на пренос радио сигнала.

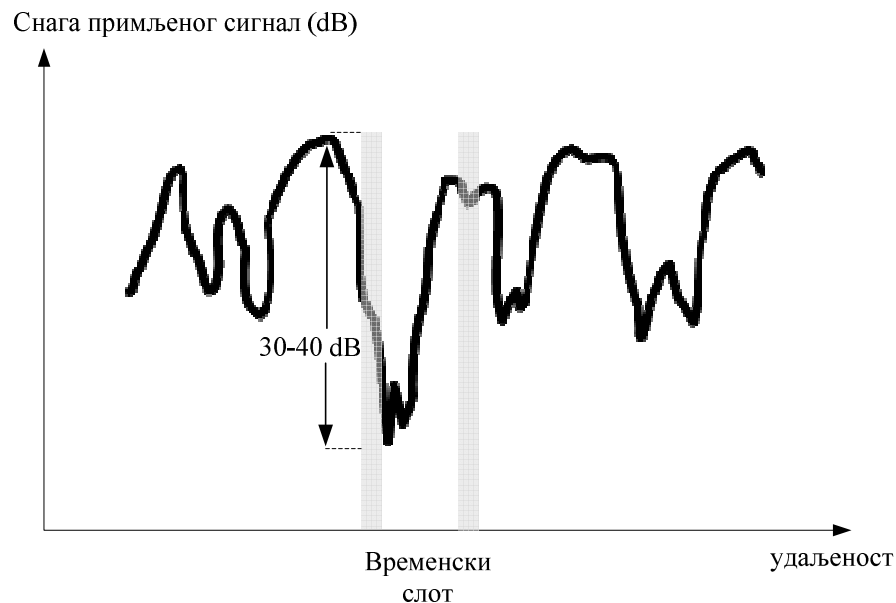
Да би се омогућило оптимално покривање одређеног подручја, поготову у областима с растућим саобраћајем, потребно је размотрити другачије конфигурације базних станица у односу на стандардни ћелијски модел. Један такав приступ који разматра проблем саобраћајног оптерећења и густине корисника је секторизација ћелије. Секторизација ћелије се односи на конфигурацију где је више базних станица постављено на једном месту, тако да покривају само угаону површину од  $120^{\circ}$  или  $180^{\circ}$ . Уобичајено је да се секторизација имплементира код базних станицама с неколико примопредајника и малом емисионом снагом. Ова конфигурација се најчешће користи у густо насељеним областима. Предност коришћења ћелије са  $120^{\circ}$  секторизацијом је могућност поновног коришћења учестаности у једном сектору, што би у случају омнидирекционе ћелије проузроковало сметње са суседним ћелијама. На слици 2.8 је приказан случај покривања ћелије са три базне станице, где свака базна станица покривао део од  $120^{\circ}$ .



Сл. 2.8 Покривање ћелије са три “секторизоване” базне станице.

## 2.6 Утицај околине на слабљење сигнала

Реалан утицај околине на радио пренос се може најближе узети у разматрање дефинисањем вредности чиниоца утицаја средине  $\gamma=4$ . На основу (2.1), сматра се на даље, да је ниво сигнала пропорционалан с удаљеношћу. Посебан осврт је потребан за случај преноса сигнала по више путања (*multipath*). Предност оваквог преноса је могућност преноса у условима када не постоји оптичка видљивост између пријемника и предајника. Проблем се јавља код сабирања сигнала на месту пријема који су прошли различите путеве, тако да имају различите амплитуде и фазе. Компоненте са различитих путања а са супротним фазама, међусобно се делимично или потпуно поништавају. То има као последицу да тренутна амплитуда обвојнице композитног сигнала има случајне и дубоке флукуације, што је приказано на слици 2.9.



Сл. 2.9 Квалитативни приказ флукуације снаге примљеног сигнала.

Поред тога, јавља се и продужено трајање пријемног сигнала у односу на предајни као последица различитих међусобних кашњења сигнала са различитих путања. Ова појава се назива дисперзија по времену. Утицај ове појаве се смањује

са смањењем брзине преноса. Може се извући закључак да сигнали са различитих путања ограничавају брзину преноса дигиталних сигнала у радио каналима.

Битно је размотрити и утицај релативне брзине пријемника и предајника на пријем сигнала. Утицај је негативан, јер услед Доплеровог ефекта долази до ширења преношеног сигнала, односно до дисперзије сигнала по учестаности. У временском домену се ово манифестује као случајна амплитудска модулација унутар сигнализационог интервала преношеног дигиталног сигнала. Таква врста дисторзије изазива велику средњу вероватноћу грешке коју није могуће уклонити. Постоји ограничење у погледу највеће брзине кретања мобилне станице да би се обезбедио одговарајући квалитет преноса. Другим речима, што је мања релативна брзина кретања MS-BTS, мања је средња вероватноћа грешке при преносу.

Фединг (*fading*) је случајна флукуација амплитуде и фазе пријемног сигнала. Променом амплитуде обвојнице пријемног сигнала, мења се и тренутни однос сигнал-шум, што директно утиче на квалитет преноса, односно на средњу вероватноћу грешке као мерила квалитета преноса сигнала. Постоје две врсте фединга, брзи и спори. Брзи фединг је се јавља као последица простирања по различитим путањама (*multipath fading*) и Доплеровог ефекта. За статистички опис обвојнице пријемног сигнала у присуству брзог фединга користе се *Rayleigh*-ева, *Rice*-ова и *Nakagami*-ева функција густине вероватноће. У случају када постоје доминантне компоненте при вишеструком простирању, флукуације постају равније и такав случај се описује *Rice*-овом густином вероватноће. Међутим, ако компоненте сигнала “трпе” исте услове простирања, фединг се описује *Rayleigh*-евом функцијом густине вероватноће. Спори фединг (*shadow fading*) се односи на случајне варијације средње снаге пријемног сигнала. За статистички опис спорог фединга користи се лог-нормална функција густине вероватноће. Спори фединг је последица присуства сенки (*shadow*) између тренутне позиције мобилне станице и позиције базне станице.

У општем случају, фединг је такође и фреквенцијски зависан. Ако је ширина опсега радио канала мала, цео опсег учестаности “трпи” исте услове простирања и то се назива фреквенцијски-неселективан радио канал. Међутим, ако је ширина опсега канала велика, појединачне учестаности “трпе” различити ниво фединга, па се овде ради о фреквенцијски-селективном радио каналу.

## 2.7 Густини мобилних станица у ћелији

Као што је познато, излазна снага базне станице се подешава у зависности од удаљености мобилне станице која је под њеном надлежношћу. Такође, расподела корисника у једној ћелији утиче на излазну снагу базне станице која покрива ту ћелију. Расподела густине корисника у ћелији је у општем случају различита. Функција густине корисника у ћелији може се описати неком функцијом  $g(x)$ , где је  $x$  растојање мобилне станице од центра ћелије односно базне станице. Функција  $g(x)$  може да се представи различитим расподелама попут:  $\beta$ -расподеле,  $\gamma$ -расподеле,  $\chi^2$ -расподеле, експоненцијалне расподеле, нормалне расподеле итд [51].

Код анализе мобилних мрежа, једна од веома честих претпоставки је да су мобилне станице униформно расподељене у ћелији. Тиме се знатно поједностављује анализа сложених сценарија који могу да наступе у ћелијама мобилних мрежа. Друга уобичајена претпоставка је да излазна снага једног канала која је случајна променљива зависи само од случајне удаљености између мобилне и базне станице. Такође, због једноставније анализе, узима се да је површина ћелије круг полупречника  $R$ .

## 2.8 Унутарћелијске везе

Унутарћелијски (*Intra-cell, intraBTS*) саобраћај је саобраћај између корисника у истој ћелији у мобилној мрежи. Некад се овај саобраћај назива интерни или локални [52, 53]. Главно својство оваквих веза је коришћење више ресурса за реализацију једног позива него у случајевима позива између различитих ћелија. Иако је у целој мрежи удео унутарћелијског саобраћаја мали у односу на целокупан саобраћај, у неким ћелијама које покривају једно место или предузеће, утицај унутарћелијског саобраћаја може бити знатан. Код професионалних и приватних мобилних мрежа (*Private Mobile Radio, PMR*) утицај унутарћелијског саобраћаја је велики, такође и у неким мрежама које покривају рурална подручја у земљама у развоју, утицај унутарћелијских позива је значајан.



Нажалост, веома је тешко наћи податке о проценту унутарћелијског саобраћаја у укупном саобраћају код мобилних мрежа.

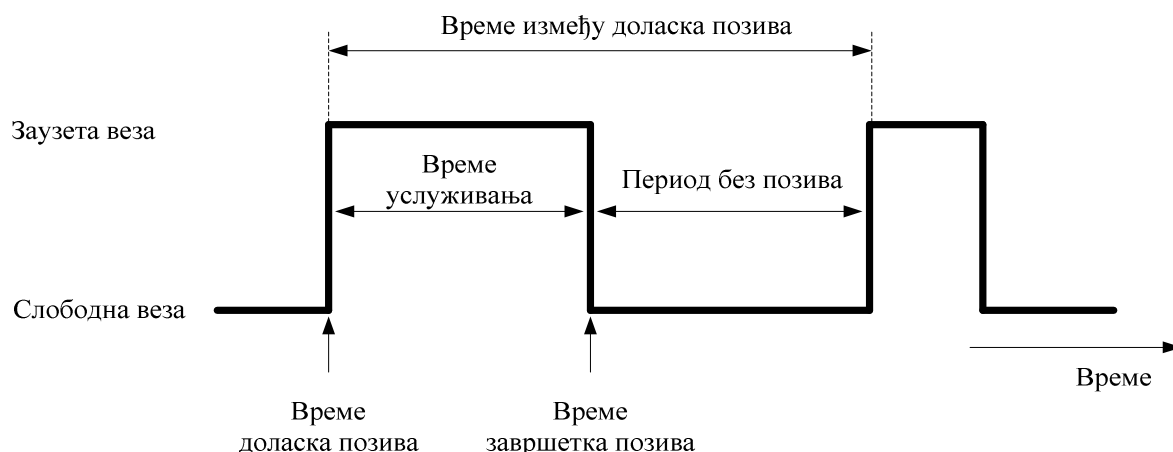
У мобилним мрежама где корисници генеришу знатан унутарћелијски саобраћај, битно је нагласити да се за одржавање једне везе између корисника у истој ћелији заузимају два саобраћајна канала. Уводи се параметар који се назива унутрашњи фактор позива (*internal call factor*) [54]. Овај параметар представља меру повећања саобраћаја у ћелији услед унутарћелијског саобраћаја и вредност му се креће до 0,3. У пракси, ако је нпр. 10% саобраћајног оптерећења унутарћелијско, саобраћај по кориснику може се помножити фактором 1,10. Веома често овај параметар се користи за анализу капацитета мреже потребног за неко подручје или зграду.

### **3. Теорија телекомуникационог саобраћаја**

### 3.1 Основна својства телекомуникационог саобраћаја

Теорија телекомуникационог саобраћаја представља примену теорије вероватноће на решавање проблема који се тичу планирања, процене перформанси, управљања и одржавања телекомуникационих система. Развој теорије телекомуникационог саобраћаја је у почетку био везан за телефонију, али се резултати уз минималне модификације могу применити и на данашње мултисервисне системе. Из историјских разлога се задржавала терминологија карактеристична за телефонију. Иако су изложени саобраћајни модели (*Erlang*-ов, *Engset*-ов и мултидимензионални модел) првобитно развијени за потребе класичне телефоније с комутацијом кола, они се, због општости приступа, могу директно применити и за опис говорног саобраћаја у GSM, а уз незнатне измене и за опис података у овим мрежама који се заснивају на принципу комутације пакета (сигнализација, SMS).

Основна теорија телекомуникационог саобраћаја (у даљем тексту само саобраћаја) је дата сагласно извору [55]. Теорија саобраћаја је индуктивна дисциплина која на основу посматрања реалног система гради теоријски модел из кога се рачунају параметри који се могу упоредити с одговарајућим опажањима код реалног система. Ако постоји слагање, модел је верификован, а ако не, модел се мора даље развијати. Интуитивно је јасно да је природно поделити саобраћајна својства на стохастичке процесе доласка позива и процесе описивања времена опслуживања. Претпоставља се да су ови процеси међусобно независни, односно да је трајање заузетости канала независно од тренутка када је позив дошао. Догађај доласка позива је стохастички процес, и време између долазака позива је описано вероватноћама расподеле које тај процес карактеришу. На слици 3.1 је приказана терминологија која се користи у теорији телефонског саобраћаја.



Сл. 3.1 Терминологија у теорији саобраћаја.

Телекомуникациони саобраћај (на  $A$ -интерфејсу мобилне мреже) представља заузимање радио канала због преноса информација између корисника, али и делова мреже, уређаја и корисничких терминала. Основно својство саобраћаја је случајност. Према томе, није могуће унапред утврдити вредност саобраћаја јер зависи од великог броја чинилаца: доба дана, дана у недељи, доба године, разних друштвених догађаја, стања телекомуникационе мреже. Из тог разлога је потребно да се код анализе саобраћаја користе статистичке методе.

Тренутни интензитет саобраћаја (*traffic intensity*) је број заузетих ресурса у датом временском тренутку. Средња вредност интензитета саобраћаја може се изразити као

$$Y(T) = \frac{1}{T} \int_0^T n(t) dt, \quad (3.1)$$

где је  $n(t)$  број заузетих ресурса у времену  $t$ .

Јединица за интензитет саобраћаја је *Erlang* (E), у част данског математичара А. К. *Erlang*-а, који је поставио темеље теорије телефонског саобраћаја. Укупан саобраћај који се преноси у току временског интервала  $T$  је обим саобраћаја (*traffic volume*), чија је јединица ерланг-час (Eh).

Понуђени саобраћај ( $A$ , *offered traffic*) је мера корисничке потребе за телефонирањем и представља основну величину у саобраћајним прорачунима. То

је саобраћај који би се пренео да ниједан од позива није одбијен због недостатка капацитета, односно да је број ресурса неограничен. Ова величина је теоретска и не може се мерити.

Особина понуђеног саобраћаја, која је блиска стварном случају је да се догађаји јављају у случајним тренуцима. У теорији случајних процеса се често посматра процес случајних догађаја који се може описати *Poisson*-овим моделом. Основна својства овога процеса су да је расподела времена између два узастопна догађаја негативно експоненцијална и да су догађаји узајамно независни.

Дужина трајања заузетости канала, односно време разговора (*holding time, service time, T*), сматра се случајном величином. Основно својство ове случајне величине је расподела дужине времена трајања заузетости канала. Из ове расподеле могу се израчунати својства попут средње вредности и остали моменти случајне величине дужине времена трајања заузетости канала. Средње време заузетости саобраћајних канала у мрежи мобилних телефона може бити средње време од почетка слања позивног сигнала траженом кориснику па до краја разговора, али и само средње време разговора.

Вероватноћа губитака (*blocking, blocking probability, loss probability*) је део позива који не могу се остварити због недостатка слободних (сигналних или говорних) канала. Означава се са  $B$ , а некад се изражава и у процентима.

Опслужени саобраћај ( $A_c$ , *carried traffic, handled traffic*) је реално остварени саобраћај; другим речима, то је саобраћај који пренесе група уређаја током временског интервала  $T$ , односно средња вредност броја заузетих канала током интервала  $T$ . Опслужени саобраћај не може прекорачити број канала. Сваки канал може да носи саобраћај од једног ерланга. Услужени саобраћај може да се измери, а рачуна се као:

$$Y = A(1 - B) . \quad (3.2)$$

На основу опслуженог саобраћаја могуће је проценити понуђени саобраћај. Ту постоје два параметра, интензитет позива,  $\lambda$ , (средњи број понуђених позива по јединици времена) и средње време опслуживања,  $s$ . Понуђени саобраћај једнак је:

$$A = \lambda \cdot s . \quad (3.3)$$

Изгубљени саобраћај је разлика између понуђеног и опслуженог саобраћаја. Вредност овог параметра може се смањити повећавањем капацитета система. Изгубљени саобраћај се рачуна се као:

$$R = A - Y = AB . \quad (3.4)$$

У циљу омогућавања анализе својстава саобраћаја, потребно је увести случајност саобраћаја у прорачун. То подразумева увођење неких претпоставки које омогућавају добијање резултата употребљивих у пракси. Претпоставке се уводе за два процеса битна за телекомуникациони саобраћај, за процес долазака позива и процес опслуживања (трајање позива).

Битно је напоменути да у телекомуникационој мрежи постоје две врсте извора саобраћаја, прави и посредни. Прави извори су корисници и за њих је карактеристично да генеришу позиве када су слободни, независно један од другог. Посредни извори су нпр. водови између централа. Независност генерисања позива није својство посредних извора саобраћаја. Другим речима, вероватноћа појављивања позива на једном извору зависи од стања осталих извора, односно извори нису прави.

За описивање перформанси једног саобраћајног система, користе се три величине којима је могуће димензионисати системе с губицима; и то губици по времену (временско загушење), загушење позива и загушење саобраћаја.

Губици по времену или временско загушење ( $E$ , *time congestion*) представљају део времена када није могуће услужити позив (или пренети податак), без обзира на то да ли је стигао или не. Губици по времену једнаки су збиру вероватноћа стања када су сви канали система заузети:

$$E = \sum_{j=n}^{\infty} P(j) . \quad (3.5)$$

Губици позива или загушење позива ( $B$ , *call congestion*) представљају део од укупног броја позива који се не могу услужити јер су сви канали система

заузети. У случају да интензитет позива не зависи од стања система, добија се да су губици позива и губици по времену једнаки,  $B=E$ .

Губици саобраћаја или саобраћајно загушење ( $C$ , *traffic congestion*) представљају део понуђеног саобраћаја који није опслужен ни после више покушаја.

### 3.2 Процеси генерисања позива и опслуживања

Процеси генерисања попут телефонског позива се описују математички као стохастички тачкасти процеси (*point process*). За процес у тачки важи да је могуће међусобно разликовати два доласка.

Посматра се процес генерисања позива у тренутку доласка једног случајног позива,  $t_0$ . Дужина временског интервала између овог и следећег тренутка доласка позива,  $t$ , је случајна величина која зависи :

- Од тренутка  $t_0$ . У интервалима слабијег саобраћаја, интервал времена до следећег позива може бити дужи него и интервалима јаког саобраћаја;
- Од позива који су генерисани пре тренутка  $t_0$ , који могу да утичу на смањење вероватноће доласка позива после  $t_0$ ;
- Од стања централе у коју позиви долазе. Велики број активних веза у тренутку  $t_0$  може утицати на смањење вероватноће генерисања новог позива;
- Од тренутака завршетка разговора који су постојали у тренутку  $t_0$ . Завршетак великог броја разговора непосредно после тренутка  $t_0$  може утицати на повећање вероватноће генерисања новог позива.

Две битне особине тачкастих процеса су стационарност (временска хомогеност) и независност. Да би се одстранио утицај тренутка  $t_0$ , односно почетка посматрања, претпоставља се да се посматрање односи на период највећег саобраћаја који има сталну (стационарну) вредност, независну од  $t_0$ . Ова претпоставка чини процес стационарним.

Да би се елиминисао утицај свих осталих чинилаца, претпоставља се да су сви нови позиви потпуно независни један од другог. То значи да ће будуће

понашање система зависити искључиво од тренутног стања, али није битно како је до тог стања дошло (одсуства меморије). Ово се назива особина независности тачкастог процеса.

Трећа битна особина за тачкасте процесе је ординарност. Тачкасти процес се назива простим ако је вероватноћа да постоји више од једног догађаја у посматраној тачки једнака нули.

Претпоставка о негативној експоненцијалној расподели вероватноћа дужине трајања времена између догађаја,  $t$ , пружа највиши степен независности. Експоненцијална расподела времена узмеђу догађаја уноси особину одсуства меморије (*absence of aftereffect; memoryless; lack of memory; markovian property*) у процес. Одсуство меморије је особина да прошлост процеса не утиче на будући развој процеса. Ова својство се види из особине процеса да је средње време између двају догађаја (експоненцијална расподела) једнако средњем времену од произвољно одабраног тренутка до следећег догађаја. Процес код кога је дужина временског интервала између узастопних догађаја случајна величина с негативном експоненцијалном расподелом назива се *Poisson*-ов процес. Најважнији тачкасти процес је *Poisson*-ов процес. Овај процес даје веома добре резултате код описивања реалних процеса због високог степена случајности.

Као што је познато, вероватноћа  $P(k, t)$  да се у временском интервалу  $t$  деси  $k$  догађаја једнака је:

$$P(k, t) = (\lambda t)^k \frac{e^{-\lambda t}}{k!}, \quad (3.6)$$

где је  $\lambda = 1/t_c$ , а  $t_c$  средња вредност дужине трајања временског интервала између двају догађаја. Величина  $\lambda$  се назива интензитетом догађаја, што би у конкретном случају био интензитет позива, односно број позива у јединици времена (*call intensity*).

Из претходне једначине се јасно види да је вероватноћа да између два позива протекне временски интервал који је дужи од  $t$  једнака вероватноћи да у том интервалу не дође ниједан позив:

$$P(0, t) = e^{-\lambda t}. \quad (3.7)$$



Функција расподеле временског интервала између узастопних позива је:

$$F(t) = 1 - P(0, t) \Rightarrow \quad (3.8)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad \lambda > 0, t \geq 0,$$

што указује на експоненцијалну расподелу дужине временског интервала између узастопних позива.

Функција густине вероватноће се у општем случају дефинише као:

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}, \quad (3.9)$$

одакле се добија:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad \lambda > 0, t \geq 0. \quad (3.10)$$

Вредности за средњу вредност и варијансу су следеће:

$$m_1 = \frac{1}{\lambda}, \sigma^2 = \frac{1}{\lambda^2}. \quad (3.11)$$

За даљу анализу ће се сматрати да процеси позива имају следеће особине:

- Позиви су случајни и међусобно независни, а извори позива су међусобно независни;
- Процес позива је *Poisson*-ов;
- Расподела вероватноће дужине трајања временског интервала између узастопних позива је експоненцијална.

Из претходног текста може се уочити да је време до тачно  $k$  долазака сума од  $k$  експоненцијално расподељених случајних променљивих. Расподела ове суме је  $k$ -*Erlang*-ова расподела, чија је густина дата са:

$$g_k(t)dt = \lambda \frac{(\lambda t)^{k-1}}{(k-1)!} e^{-\lambda t} dt, \quad \lambda > 0, t \geq 0, k = 1, 2, \dots \quad (3.12)$$

За  $k = 1$  се добија експоненцијална расподела. Расподела  $g_{k+1}(t)$ ,  $k > 0$  се добија конволуцијом  $g_k(t)$  и  $g_1(t)$ :

$$g_{k+1}(t) = \int_0^t g_k(t-x) g_1(x) dx = \lambda \frac{(\lambda t)^k}{k!} \cdot e^{-\lambda t}. \quad (3.13)$$

Како је горњи израз важећи за  $k = 1$ , индукцијом се може показати да важи и за било које  $k$ . Са становишта статистике, *Erlang*- $k$  расподела представља специјални случај гама расподеле. Средња вредност и варијанса *Erlang*- $k$  расподеле се добијају као:

$$m_1 = \frac{k}{\lambda}, \sigma^2 = \frac{k}{\lambda^2}. \quad (3.14)$$

Као што је већ напоменуто, *Poisson*-ов процес долазака има и особину ординарности. То је особина да је вероватноћа доласка два или више позива у кратком временском интервалу занемарљива у односу на вероватноћу доласка једног или ниједног позива. Из израза (3.9.) се види да је за  $\Delta t \rightarrow 0$

$$P(1, \Delta t) = \lambda \Delta t e^{-\lambda \Delta t} \quad (3.15)$$

$$P(j, \Delta t) = (\lambda \Delta t)^j \frac{e^{-\lambda \Delta t}}{j!}, \quad j > 1 \quad (3.16)$$

или после развоја у ред

$$P(1, \Delta t) = \lambda \Delta t + o(\Delta t) \quad (3.17)$$

$$P(j, \Delta t) = o(\Delta t), \quad j > 1 \quad (3.18)$$

где је  $o(\Delta t)$  бесконачно мала величина вишег реда у односу на  $\Delta t$ .

Процес опслуживања је одређен боравком позива у систему за опслужење [40]. Позиви имају два битна својства: међусобну зависност и дужину трајања разговора.

Дужина трајања разговора је приближно описана експоненцијалном расподелом. Вероватноћа  $P(1, x)$  да један разговор траје дуже од временског интервала  $x$  је дата изразом:

$$P(1, x) = e^{-x/t_m}, \quad (3.19)$$

где је  $t_m$  средња вредност дужине трајања разговора.

Одредимо вероватноћу  $P(j, x)$  да се ниједан од  $j$  разговора неће завршити за време  $x$ . Сви разговори су међусобно независни, а време сваког разговора је одређено истом расподелом вероватноћа да сви разговори трају бар  $x$ . Вероватноћа  $P(j, x)$  је једнака производу вероватноћа да сваки од разговора траје бар  $x$ :

$$P(j, x) = \left( e^{-\frac{x}{tm}} \right)^j = e^{-\frac{jx}{tm}} = e^{-\frac{x}{\left(\frac{tm}{j}\right)}}. \quad (3.20)$$

Расподела времена завршетка првог од  $j$  разговора је такође експоненцијална са  $j$  пута мањом средњом вредношћу. Број завршетака разговора је одређен *Poisson*-овом расподелом. Вероватноћа  $P(1, j, \Delta t)$  да се у кратком временском интервалу  $\Delta t$  заврши један од  $j$  разговора је

$$P(1, j, \Delta t) = \frac{\Delta t}{\left(\frac{tm}{j}\right)} + o(\Delta t) = \left(\frac{j\Delta t}{tm}\right) + o(\Delta t). \quad (3.21)$$

Може се једноставно показати да је вероватноћа  $P(k, j, \Delta t)$  да се у кратком временском интервалу  $\Delta t$  заврши  $k$  од  $j$  разговора:

$$P(k, j, \Delta t) = o(\Delta t), \quad (3.22)$$

чиме се показује да је и процес завршетака разговора ординаран.

Број позива и број завршетака разговора се мењају за по 1, па се процес долазака позива назива процесом рађања (*birth process*) а процес завршетка разговора назива процесом умирања (*death process*).

### 3.3 Модел савршеног снопа

Савршени сноп или група потпуне доступности (*fully available group*) је група канала за опслуживање чије је главна карактеристика да сваки позив може у сваком тренутку да заузме сваки слободан канал. Савршени сноп може да врши услугу са губицима где се одбија сваки позив пристигао у тренутку заузећа свих канала снопа. Такође, савршени сноп омогућава и функцију чекања, међутим она

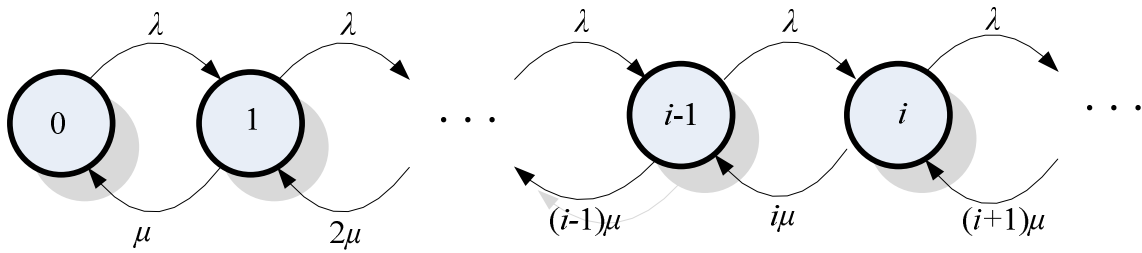
није од великог практичног интереса у мрежи мобилне телефоније када су у питању телефонски позиви.

Основно својство савшеног снопа је број истовремено заузетих канала и ово својство се назива стањем снопа. Савршени снап је у потпуности одређен у саобраћајном смислу ако је позната расподела вероватноћа стања (*probability of state*). Стање у коме је заузето  $i$  канала се обично означава са  $\{i\}$  а вероватноћа стања са  $p(i)$ .

Посматра се савршени снап који се састоји од  $n$  канала. У општем случају се подразумева да:

- Систем може бити са губицима (*lost calls cleared system*) или са чекањем (*waiting system*);
- Група правих извора генерише независне позиве;
- Дужина времена трајања разговора је случајна величина;
- Не захтева се да зависног процеса долазака позива од стања снопа;
- Процеси долазака позива и завршавања разговора имају особину ординарности.

За описивање савшеног снопа је уобичајено да се користи дијаграм преласка стања приказан на слици 3.2. Дефинише се стање система,  $\{i\}$ , као број заузетих канала  $i$  ( $i = 0, 1, 2 \dots$ ). Под претпоставком да се систем налази у статистичкој равнотежи, систем ће бити у стању  $\{i\}$  део времена  $p(i)$ , где је  $p(i)$  вероватноћа опажања система у стању  $\{i\}$  у произвољном временском тренутку. Када је систем у стању  $\{i\}$ , прећи ће у стање  $\{i + 1\}$   $\lambda$  пута у јединици времена и у стање  $\{i - 1\}$   $\mu$  пута у јединици времена. Будући развој саобраћајних процеса ће зависити само од тренутног стања система, али не и од тога како је процес дошао у ово стање, што је тзв. Марковљево својство.



Сл. 3.2 Дијаграм транзиције стања за неограничен број канала.

Једначине за описивање стања система под претпоставком статистичке равнотеже могу да буду постављене на два начина и оба су заснована на принципу глобалне равнотеже:

- **Једначине чворова** (*Node equations*)

У статистичкој равнотежи, број улазака у стање  $\{i\}$  по јединици времена је једнак броју излазака из  $\{i\}$  по јединици времена. Вероватноће стања  $p(i)$  означавају део времена за које се процес налази у стању  $\{i\}$ . Просечан број скокова из стања  $\{0\}$  у стање  $\{1\}$  је  $\lambda \cdot p(0)$  по јединици времена, а просечан број скокова из стања  $\{1\}$  у стање  $\{0\}$  је  $\mu \cdot p(1)$  по јединици времена. Стога добијамо за стање  $i = 0$ :

$$\lambda \cdot p(0) = \mu \cdot p(1), \quad i = 0. \quad (3.23)$$

За стање  $i > 0$  се добија следећа једначина равнотеже (*balance equation*):

$$\lambda \cdot p(i - 1) + (i + 1)\mu \cdot p(i + 1) = (\lambda + i\mu) \cdot p(i), \quad i > 0. \quad (3.24)$$

- **Једначине пресека** (*Cut equations*)

У великом броју случајева може да се користи једноставна структура дијаграма транзиције стања. Ако се пресече веза између стања  $\{i - 1\}$  и  $\{i\}$ , онда у статистичкој равнотежи саобраћајни процес прелази из стања  $\{i - 1\}$  у стање  $\{i\}$  онолико пута пута колико пређе из стања  $\{i\}$  у стање  $\{i - 1\}$ . Стога се по јединици времена у статичкој равнотежи добија:

$$\lambda \cdot p(i - 1) = i\mu \cdot p(i), \quad i = 1, 2, \dots \quad (3.25)$$

Једначине пресека се једноставно примењују код једнодимензионалних дијаграма транзиције стања, док су једначине чворова примењиве у општем случају. Као што може да се уочи из претходних једначина, број прелазака у јединици времена из једног стања у једно од суседних стања једнако је броју прелазака у јединици времена у супротном смеру. Из тог разлога се ове једначине називају једначинама статистичке равнотеже.

Пошто ће систем увек бити у неком стању, уводе се нормализациона ограничења:

$$\sum_{i=0}^{\infty} p(i) = 1, \quad p(i) \geq 0. \quad (3.26)$$

Ако се узме у разматрање једнодимензионални дијаграм транзиције стање, најпогодније је применити једначине пресека, као што је већ напоменуто. Са слике 3.4 добијају се следеће једначине равнотеже:

$$\begin{aligned} \lambda \cdot p(0) &= \mu \cdot p(1), \\ \lambda \cdot p(1) &= 2\mu \cdot p(2), \\ &\dots \quad \dots \\ \lambda \cdot p(i-2) &= (i-1)\mu \cdot p(i-1), \\ \lambda \cdot p(i-1) &= i\mu \cdot p(i), \\ \lambda \cdot p(i) &= (i+1)\mu \cdot p(i+1), \\ &\dots \quad \dots \end{aligned} \quad (3.27)$$

Ако се све вероватноће стања изразе преко  $p(0)$  и уведе понуђени саобраћај  $A = \frac{\lambda}{\mu}$ , нормализациона ограничења налажу:

$$1 = \sum_{j=0}^{\infty} p(j) = p(0) \left\{ 1 + A + \frac{A^2}{2!} + \dots + \frac{A^i}{i!} + \dots \right\} = p(0)e^A \quad \Rightarrow \quad (3.28)$$

$$p(0) = e^{-A},$$

стога вероватноће стања постају расподељене по *Poisson*-овом закону:

$$p(i) = \frac{A^i}{i!} \cdot e^{-A}, \quad i = 0, 1, 2, \dots \quad (3.29)$$

Број заузетих канала у произвољном временском тренутку има *Poisson*-ову расподелу са средњом вредношћу и варијансом једнаким понуђеном саобраћају  $A$ .

Карактеристике саобраћаја модела савршеног снопа су следеће:

- Временско загушење  $E = 0$ ,
- Загушење позива  $B = 0$ ,
- Опслужени саобраћај  $Y = \sum_{i=1}^{\infty} i \cdot p(i) = A$ ,
- Изгубљени саобраћај  $A_l = A - Y = 0$ ,
- Загушење саобраћаја  $C = 0$ .

Укупан интензитет за напуштање стања  $\{i\}$  је константан и једнак  $\lambda + i\mu$ , па је онда време задржавања у стању  $\{i\}$  експоненцијално расподељено и описано функцијом густине вероватноће:

$$f_i(t) = (\lambda + i\mu) \cdot e^{-(\lambda + i\mu)t}, \quad t \geq 0. \quad (3.30)$$

Овакав систем има неограничен капацитет, па стога и није примењив у пракси. У наредним поглављима су описана два модела која се користе код реалних саобраћајних прорачуна.

### 3.4 Erlang-ов модел

Ерлангови модели су једни од најстаријих метода за прорачун саобраћаја. У мрежи мобилне телефоније највише се користи *Erlang*-ов модел с губицима [55]. Овај модел повезује понуђени саобраћај, број канала за опслуживање и вероватноћу губитака позива при чему се уводе се следеће претпоставке:

- Разматра се систем од  $n$  идентичних канала у паралели (хомогена група);
- Долазни позив се прихвата ако има бар један слободан канал;
- Ако су сви канали заузети, долазни позиви се одбијају и нема поновљених позива;

- Време опслуживања је независно од долазних позива и других времена опслуживања;
- Процес долазних позива је *Poisson*-ов са интензитетом  $\lambda$ ;
- Време опслуживања има експоненцијалну расподелу с интензитетом  $\mu$ .

Оваква врста саобраћаја се своди на чисте процесе рађања и умирања, односно на прост Марковљев процес који се може једноставно математички анализирати.

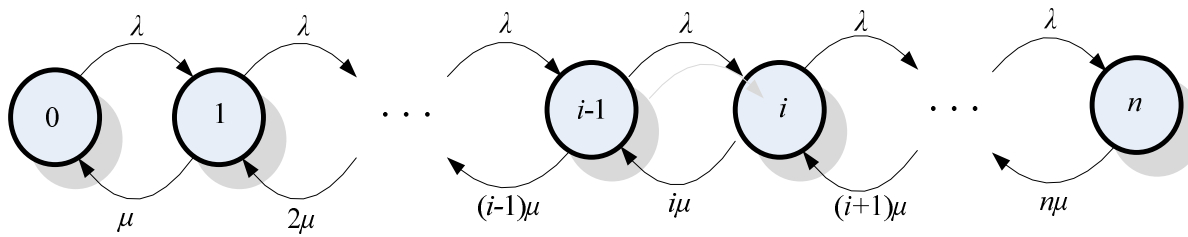
Понуђени саобраћај је опслужени саобраћај када је број канала бесконачан. Код *Erlang*-овог модела с губицима с *Poisson*-овим процесом долазака позива, понуђени саобраћај је једнак средњем броју покушаја позива по средњем времену опслуживања:

$$A = \lambda \frac{1}{\mu} = \frac{\lambda}{\mu}. \quad (3.31)$$

Узима се да је број канала  $n < \infty$ . Параметри за оцену перформанси система с губицима су временско загушење ( $E$ ), загушење позива ( $B$ ) и загушење саобраћаја ( $C$ ). Прорачун саобраћаја се примењује на временски интервал највећег оптерећења. Овај интервал се ограничава на 60 узастопних минута у току дана и назива се час главног оптерећења, (*Busy Hour*, ВН). Претпоставља се да је број извора саобраћаја ( $N$ ) врло велики у односу на број канала опслуживања  $n$ .

**Порачун модела не зависи од расподеле дужине времена заузетости канала, већ само од средње вредности овог времена,  $t_m$ .** У литератури на енглеском језику се ово својство назива *insensitivity of Erlang formula of holding time distribution*. Ово својство је веома битно јер омогућује анализу саобраћаја са различитим расподелама дужине времена трајања. Другим речима, **може се сматрати да је анализа довољно општа да је у њу укључен и пренос говорног саобраћаја и пренос података.** На слици 3.3 приказан је дијаграм транзиције стања за ограничени број канала.




 Сл. 3.3 Дијаграм транзиције стања за *Erlang*-ов модел.

За приказани дијаграм транзиције стања, може да се постави сличан систем једначина пресека као и код модела савршеног снопа, са разликом ограниченог простора стања  $\{0, 1, \dots, n\}$ . Нормализациони услов постаје:

$$p(0) = \left\{ \sum_{j=0}^n \frac{A^j}{j!} \right\}^{-1}. \quad (3.32)$$

Из овог услова се добија одсечена *Poisson*-ова расподела (*truncated Poisson distribution*):

$$p(i) = \frac{\frac{A^i}{i!}}{\sum_{j=0}^n \frac{A^j}{j!}}, \quad 0 \leq i \leq n. \quad (3.33)$$

Вероватноћа да је свих  $n$  канала заузето у произвољном временском тренутку је једнака делу времена у коме су сви канали заузети. За  $i = n$  следи следећи израз:

$$E_n(A) = p(n) = \frac{\frac{A^n}{n!}}{\sum_{j=0}^n \frac{A^j}{j!}} = \frac{\frac{A^n}{n!}}{1 + A + \frac{A^2}{2!} + \dots + \frac{A^n}{n!}}. \quad (3.34)$$

Овај израз се назива *Erlang*-ова формула прве врсте или *Erlang-B* (*Blocking*) формула. Ова формула повезује понуђени саобраћај,  $A$ , број канала за услуживање,  $n$ , и губитке,  $B$ .

Вероватноћа да ће се случајан долазак позива изгубити једнака је делу позива који су блокирани:

$$B_n(A) = \frac{\lambda \cdot p(n)}{\sum_{i=0}^n \lambda \cdot p(i)} = p(n) = E_n(A). \quad (3.35)$$

Именилац у разломку представља средњи број покушаја позива по јединици времена, а бројилац представља средњи број блокираних позива по јединици времена.

*Erlang-B* формула се користи за прорачуне броја саобраћајних и сигнализационих канала у мрежи мобилне телефоније. Наиме, на основу процењених вредности понуђеног саобраћаја, одређује се број канала тако да губитак позива услед недостатка слободних канала не буде већи од неке унапред дефинисане вредности.

Опслужени саобраћај  $Y$  се може добити постављањем једначина пресека између стања  $\{i - 1\}$  и  $\{i\}$  на следећи начин:

$$Y = \sum_{i=1}^n i \cdot p(i) = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda}{\mu} \cdot p(i - 1) = A\{1 - p(n)\}, \quad (3.36)$$

$$Y = A\{1 - E_n(A)\},$$

где је  $A$  понуђени саобраћај. Опслужени саобраћај ће бити мањи и од  $A$  и од  $n$ .

Изгубљени саобраћај се може добити преко израза:

$$A_l = A - Y = A \cdot E_n(A). \quad (3.37)$$

Саобраћајно загушење се може изразити као:

$$C = \frac{A - Y}{A} = E_n(A). \quad (3.38)$$

Пошто је интензитет позива независан од стања, јасно се види да важи следећа једнакост:

$$A = B = C. \quad (3.39)$$

Ово својство система се назива *PASTA (Poisson Arrivals See Time Averages)* и важи за све системе са *Poisson*-овим процесима долазака позива.

Укупан интензитет за напуштање стања  $\{i\}$  је константан и једнак  $(\lambda + i\mu)$ , па је онда време задржавања у стању  $\{i\}$  експоненцијално расподељено и описано функцијом густине вероватноће:

$$f_i(t) = (\lambda + i\mu) \cdot e^{-(\lambda+i\mu)t}, \quad 0 \leq i < n \quad (3.40)$$

$$f_i(t) = (n\mu) \cdot e^{-(n\mu)t}, \quad i = n.$$

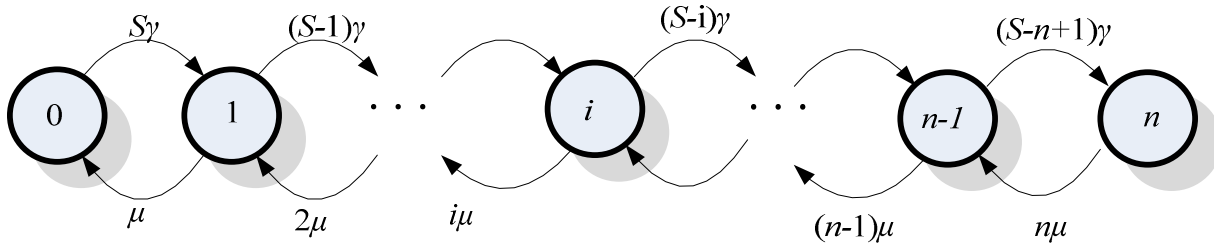
### 3.5 Engset-ов модел

Као што је већ речено, једна од претпоставки *Erlang*-овог модела је независност интензитета позива од стања снопа односно броја заузетих канала. Најпознатији модел у коме интензитет позивања зависи од стања система се назива *Engset*-ов модел. Модел је заснован на скупу од  $n$  канала за опслуживање и коначном броју извора саобраћаја  $S$  (корисници) а интензитет позивања је сразмеран броју слободних извора саобраћаја. У општем случају се овај модел примењује код мање групе корисника. Узима се у обзир чињеница да у групи са ограниченим бројем извора саобраћаја интензитет позива опада с повећањем броја веза, односно бројем заузетих извора.

Уводи се претпоставка да је време опслуживања експоненцијално расподељено са интензитетом  $\mu$ , па се стога саобраћајни процес своди на процес рађања и умирања, односно специјални Марковљев процес. Уобичајено је да се стање система дефинише као број заузетих канала. Сви процеси који се разматрају су неосетљиви на расподелу времена опслуживања, односно само је средње време опслуживања битно за вероватноће стања.

Број извора саобраћаја,  $S$ , је ограничен и већи је од броја доступних канала ( $S > n$ ), што значи да систем може да уђе у загушење (систем са губицима). Појединачни извори су слободни током временског интервала који има експоненцијалну расподелу с константним интензитетом позива  $\gamma$ . Када су заузети, интензитет позива једнак је нули, односно извор је заузет током временског интервала који има експоненцијалну расподелу са интензитетом  $\mu$ . Оваква врста извора се назива спорадичним изворима. Из свега реченог је јасно да

процес долазака зависи од стања система. Ако је  $i$  извора заузето, онда је интензитет долазака једнак  $(S - i)\gamma$ . Другим речима, вероватноћа појављивања новог позива се смањује с повећавањем броја услужених корисника. За даљу анализу, систем се описује с дијаграмом транзиције стања, на основу кога је могуће поставити једначине у статистичкој равнотежи. На слици 3.4 је приказан дијаграм транзиције стања система са ограниченим бројем извора и канала, где је број извора већи од броја канала.



Сл. 3.4 Дијаграм транзиције стања за *Engset*-ов модел.

На основу приказаног дијаграма могуће је поставити једначине пресека између суседних стања:

$$\begin{aligned}
 S\gamma \cdot p(0) &= \mu \cdot p(1), \\
 (S - 1)\gamma \cdot p(1) &= 2\mu \cdot p(2), \\
 &\dots \dots \\
 (S - i)\gamma \cdot p(i) &= (i + 1)\mu \cdot p(i + 1), \\
 &\dots \dots \\
 (S - n - 1)\gamma \cdot p(n - 1) &= n\mu \cdot p(n).
 \end{aligned} \tag{3.41}$$

Потом се све вероватноће стања изразе преко  $p(0)$ , и пошто укупна сума свих вероватноћа мора бити једнака јединици, добија се:

$$\begin{aligned}
 1 &= p(0) \cdot \left\{ 1 + \binom{S}{1} \cdot \left(\frac{\gamma}{\mu}\right)^1 + \binom{S}{2} \cdot \left(\frac{\gamma}{\mu}\right)^2 + \dots + \binom{S}{n} \cdot \left(\frac{\gamma}{\mu}\right)^n \right\} = \\
 &= p(0) \left\{ 1 + \frac{\gamma}{\mu} \right\}^n,
 \end{aligned} \tag{3.42}$$

Ако се уведе да је  $\beta = \frac{\nu}{\mu}$ , добија се да је:

$$p(0) = \frac{1}{(1 + \beta)^n}. \quad (3.43)$$

Параметар  $\beta$  представља понуђени саобраћај по слободном извору. Из претходних једначина даље следи:

$$p(i) = \frac{\binom{S}{i} \cdot \beta^i}{\sum_{j=0}^n \binom{S}{j} \cdot \beta^j}. \quad (3.44)$$

Ако се уведе понуђени саобраћај по извору  $\alpha = \beta/(1 + \beta)$ , добија се коначно:

$$p(i) = \frac{\binom{S}{i} \cdot \alpha^i \cdot (1 - \alpha)^{S-i}}{\sum_{j=0}^n \binom{S}{j} \cdot \alpha^j \cdot (1 - \alpha)^{S-j}}, \quad 0 \leq i \leq n. \quad (3.45)$$

Временско загушење ( $E$ ) је по дефиницији део времена када су сви канали заузети:

$$E_{n,S}(\beta) = p(n) = \frac{\binom{S}{n} \cdot \beta^n}{\sum_{j=0}^n \binom{S}{j} \cdot \beta^j}, \quad S \geq n. \quad (3.46)$$

Загушење позива ( $B$ ) је по дефиницији део позива који се изгубе. Само доласци позива у систем у стање  $n$  се блокирају. Током једне јединице времена добија се следећи однос броја блокираних позива и укупног броја позива:

$$B_{n,S}(\beta) = \frac{\binom{S-1}{n} \cdot \beta^n}{\sum_{j=0}^n \binom{S-1}{j} \cdot \beta^j}, \quad (3.47)$$

$$B_{n,S}(\beta) = E_{n,S-1}(\beta), \quad S \geq n.$$

Из овог израза се може закључити да је вероватноћа позива који потиче из случајног извора који је одбијен једнака вероватноћи да преосталих  $S - 1$  извора заузима свих  $n$  канала. Ово се у литератури назива теоремом о доласку (*Arrival theorem*) и важи за системе са губицима и системе са кашњењем, с ограниченим бројем извора.

Укупан понуђени саобраћај може се изразити као производ броја извора и понуђеног саобраћаја по појединачном извору:

$$A = S \cdot \alpha = \frac{S\beta}{1 + \beta}. \quad (3.48)$$

Опслужени саобраћај  $Y$  се може добити постављањем једначина пресека између стања  $\{i - 1\}$  и  $\{i\}$ :

$$Y = \sum_{i=1}^n i \cdot p(i) = \sum_{i=1}^n \frac{\gamma}{\mu} \cdot p(S - i - 1)p(i - 1) = \quad (3.49)$$

$$Y = \frac{\beta}{1 + \beta} \cdot [S - (S - n) \cdot E].$$

Загушење саобраћаја ( $C = C_{n,S}(A)$ ) је најбитнија мера загушења, дата са:

$$C = \frac{A - Y}{A} = \frac{S - n}{S} \cdot E. \quad (3.50)$$

Такође је могуће изразити укупан услужени саобраћај и временско загушење ако се познаје загушење позива  $B$ :

$$Y = S \cdot y = S \cdot \frac{\beta(1 - B)}{1 + \beta(1 - B)},$$

$$E = \frac{S}{S - n} \cdot \frac{B}{1 + \beta(1 - B)}. \quad (3.51)$$

Изгубљени саобраћај се може добити преко израза:

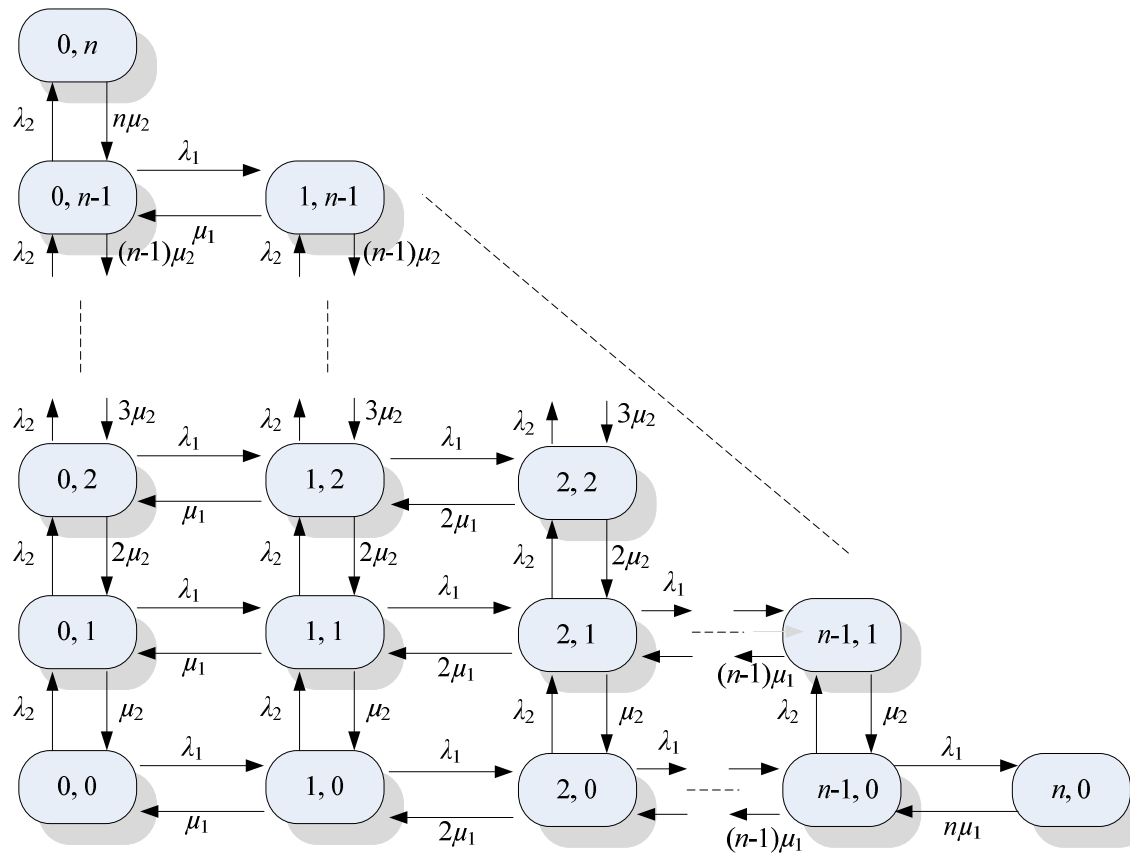
$$A_l = A \cdot C = \frac{(S - n)\beta}{1 + \beta} \cdot E \quad (3.52)$$

Види се да вероватноћа губитака није директно зависна од понуђеног саобраћаја, већ су и понуђени саобраћај и губици зависни од понуђеног саобраћаја по слободном извору,  $\alpha$ . Битно је напоменути да је расподела дужине трајања времена опслуживања односно разговора без утицаја на величину губитака у *Erlang*-овом и *Engset*-овом моделу с *Poisson*-овим током позива. Ова особина се у литератури на енглеском језику *robustness of service time*.

Резултати добијени по *Engset*-овом моделу са становишта опслуживања дају повољније резултате у односу на резултате добијене *Erlang*-овим моделом. То значи да се добијају мањи губици за исти понуђени саобраћај и исти број канала. Другим речима, потребно је мање канала код *Engset*-овог у односу на *Erlang*-ов модел за исти понуђени саобраћај и исте највеће дозвољене губитке. Уобичајено је да се каже да *Erlang*-ов модел даје конзервативније резултате.

### 3.6 Модели са мултидимензионалним саобраћајним процесима

Разматра се, најпре, група од  $n$  канала са два независна саобраћајна тока:  $(\lambda_1, \mu_1)$  и  $(\lambda_2, \mu_2)$ . Понуђени саобраћаји за ова два тока су редом:  $A_1 = \lambda_1/\mu_1$  и  $A_2 = \lambda_2/\mu_2$ . Нека се посматра стање система  $\{i, j\}$ , где је  $i$  број позива из првог тока, а  $j$  број позива из другог тока саобраћаја. На слици 3.5 је дат дијаграм преласка стања.



Сл. 3.5 Дводимензионални дијаграм транзиције стања за систем са губицима.

Уводе се следећа ограничења:

$$0 \leq i \leq n, \quad 0 \leq j \leq n, \quad 0 \leq i + j \leq n. \quad (3.53)$$

Под претпоставком статистичке равнотеже, вероватноће стања се рачунају решавањем глобалних једначина равнотеже за сваки од чворова. Може се једноставно показати да су глобалне једначине равнотеже задовољене за вероватноће стања које се могу претставити у облику производа:

$$p(i, j) = p(i) \cdot p(j) = Q \cdot \frac{A_1^i}{i!} \cdot \frac{A_2^j}{j!}, \quad (3.54)$$

где су  $p(i)$  и  $p(j)$  су једнодимензионалне одсечене *Poisson*-ове расподеле,  $Q$  је нормализациона константа, и  $\{i, j\}$  задовољавају горе дефинисана ограничења. Пошто је реч о *Poisson*-овим процесима долазака, временско загушење, загушење позива и загушење саобраћаја су исти за оба саобраћајна тока и једнаки су  $p(i + j = n)$ .

Конволуцијом две *Poisson*-ове расподеле израчунавају се здружене вероватноће стања, где се  $Q$  добија нормализацијом:

$$p(i + j = x) = Q \cdot \frac{(A_1 + A_2)^x}{x!},$$

$$Q^{-1} = \sum_{v=0}^n \frac{(A_1 + A_2)^v}{v!}. \quad (3.55)$$

Ово је одсечена *Poisson*-ова расподела с понуђеним саобраћајем:

$$A = A_1 + A_2. \quad (3.56)$$

Овај модел може да се интерпретира и као *Erlang*-ов систем са губицима с једним *Poisson*-овим процесом доласка и хиперекспоненцијалном расподелом времена трајања опслуживања [55]. Укупан процес долазака је суперпозиција два *Poisson*-ова процеса са укупним интензитетом долазака:

$$\lambda = \lambda_1 + \lambda_2, \quad (3.57)$$

и хиперекспоненцијалном расподелом времена трајања опслуживања:

$$f(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} \cdot \mu_1 \cdot e^{-\mu_1 t} + \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \cdot \mu_2 \cdot e^{-\mu_2 t}. \quad (3.58)$$



Средња вредност времена опслуживања је:

$$m_1 = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} \cdot \frac{1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \cdot \frac{1}{\mu_2} = \frac{A_1 + A_2}{\lambda_1 + \lambda_2},$$

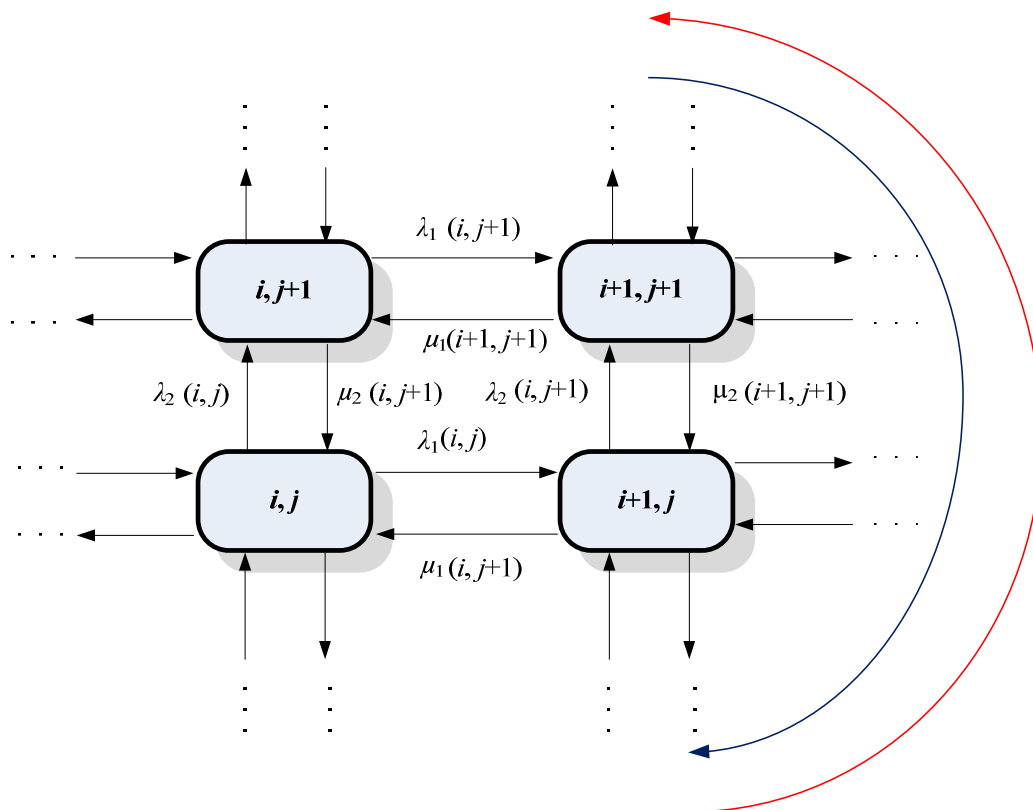
$$m_1 = \frac{A}{\lambda}.$$
(3.59)

Описани модел може да се генерализује на  $N$  саобраћајних токова:

$$p(i_1, i_2, \dots, i_N) = Q \cdot \frac{A_1^{i_1}}{i_1!} \cdot \frac{A_2^{i_2}}{i_2!} \cdot \dots \cdot \frac{A_N^{i_N}}{i_N!}, \quad 0 \leq i_j \leq n, \quad \sum_{j=1}^N i_j \leq n,$$
(3.60)

што представља општу мултидимензионалну *Erlang-B* формулу.

У случају када се број саобраћајних токова повећава, повећава се и број стања веома брзо, а тиме и број једначина. Нека се у разматрање узме дводимензионални дијаграм транзиције стања приказан на слици 3.6. Процес је реверзибилан ако је производ коефицијената код обиласка у смеру казаљке на сату (плава крива) једнак производу коефицијената при обиласку у супротном смеру (црвена крива) [56].



Сл. 3.6 Реверзибилни Марковљев процес

Са дијаграма се добија:

Смер казаљке на сату

$$\begin{aligned}
 \{i, j\} &\rightarrow \{i, j + 1\} : p(i, j) \cdot \lambda_2(i, j) \\
 \{i, j + 1\} &\rightarrow \{i + 1, j + 1\} : p(i, j + 1) \cdot \lambda_1(i, j + 1) \\
 \{i + 1, j + 1\} &\rightarrow \{i + 1, j\} : p(i + 1, j + 1) \cdot \mu_2(i + 1, j + 1) \\
 \{i + 1, j\} &\rightarrow \{i, j\} : p(i + 1, j) \cdot \mu_1(i + 1, j)
 \end{aligned} \tag{3.61}$$

Супротно од смера казаљке на сату

$$\begin{aligned}
 \{i, j\} &\rightarrow \{i + 1, j\} : p(i, j) \cdot \lambda_1(i, j) \\
 \{i + 1, j\} &\rightarrow \{i + 1, j + 1\} : p(i + 1, j) \cdot \lambda_2(i + 1, j) \\
 \{i + 1, j + 1\} &\rightarrow \{i, j + 1\} : p(i + 1, j + 1) \cdot \mu_1(i + 1, j + 1) \\
 \{i, j + 1\} &\rightarrow \{i, j\} : p(i, j + 1) \cdot \mu_2(i, j + 1)
 \end{aligned} \tag{3.62}$$

Приказане једначине могу и даље да се уређују. Може се показати да неопходан и довољан услов реверзибилности лежи у једнакости следеће две једначине:

Смер казаљке на сату

$$\lambda_2(i, j) \cdot \lambda_1(i, j + 1) \cdot \mu_2(i + 1, j + 1) \cdot \mu_1(i + 1, j) \tag{3.63}$$

Супротно од смера казаљке на сату

$$\lambda_1(i, j) \cdot \lambda_2(i + 1, j) \cdot \mu_1(i + 1, j + 1) \cdot \mu_2(i, j + 1) . \tag{3.64}$$

Вероватноћа стања  $p(i, j)$  се може изразити преко  $p(0, 0)$  избором било које путање између два стања (критеријум *Kolmogorov*-а). Ако се изабере путања:

$$(0, 0), (1, 0), \dots, (i, 0), (i, 1), \dots, (i, j) , \tag{3.65}$$

добијају се следеће једначине равнотеже:

$$p(i, j) = \frac{\lambda_1(0, 0)}{\mu_1(1, 0)} \cdot \frac{\lambda_1(1, 0)}{\mu_1(2, 0)} \dots \frac{\lambda_1(i - 1, 0)}{\mu_1(i, 0)} \cdot \frac{\lambda_2(i, 0)}{\mu_2(i, 1)} \cdot \frac{\lambda_2(i, 1)}{\mu_2(i, 2)} \dots \frac{\lambda_1(i, j - 1)}{\mu_1(i, j)} \cdot p(0, 0) . \tag{3.66}$$

Услов реверзибилности ће бити испуњен у великом броју случајева, на пример за:

$$\lambda_1(i, j) = \lambda_1(i), \quad \lambda_2(i, j) = \lambda_2(j), \quad \mu_1(i, j) = i \cdot \mu_1, \quad \mu_2(i, j) = j \cdot \mu_2 . \tag{3.67}$$

## **4. Симулација телекомуникационог саобраћаја**

## 4.1 Појам симулације

Симулација представља опонашање појава и процеса из стварног света. У општем случају постоје ситуације за које није могуће или је, пак, тешко описати систем аналитички. Наиме, стварни систем често није доступан за анализу, па се као алтернатива узима његов сурогат у виду модела, математичког или физичког. Математички модел подразумева скуп квантитативних и логичких зависности чијим се решавањем може доћи до одзива система. Значај практичне примене математичких модела је велики због њихове скалабилности, међутим, често се у опис система уводе апроксимације и занемаривања. Математички модел може бити континуалан или дискретан у зависности на какав се систем односи, статички или динамички што одређује (не)зависност од времена, детерминистички или стохастички у зависности од тога да ли у моделу фигуришу случајне променљиве [57]. Са друге стране, физички модел је умањена варијанта стварног система. Добра страна физичких модела је њихова очигледност, међутим, недостаци су висока цена и ограничена могућност примене.

Независно од типа математичког модела, ако је он једноставан, решаваће се аналитички. У општем случају, математички модел није увек могуће решити аналитички, или је до решења тешко доћи. У оваквим ситуацијама, рачунарска симулација је метод избора за анализу система. Математички модел који се решава симулацијом назива се и симулационим моделом.

Конкретно, симулација телекомуникационог саобраћаја представља опонашање процеса долазака позива и процеса њиховог опслуживања на рачунару.

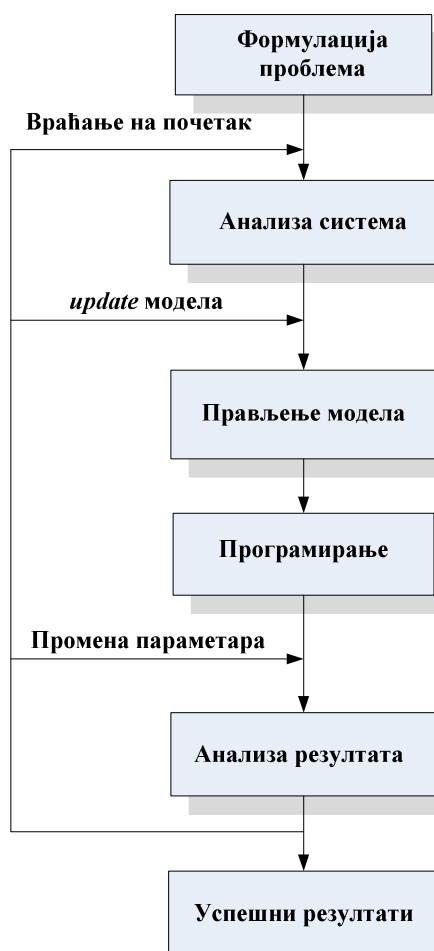
Постоји више разлога зашто вршити симулацију. Један од главних циљева је провера резултата добијених теоријским разматрањима. Другим речима, добијени теоријски резултати се верификују симулационим процесом. Овакав начин провере је много једноставнији и флексибилнији у односу на мерења, поготова са аспекта дужине трајања провере која је у случају симулације знатно краћа.

Други циљ симулације је испитивање својстава сложених система опслуживања за које не постоји начин да се лако прорачунају. Случај овако

комплексне анализе може да буде симулација целокупног управљачког блока телекомуникационе мреже.

Трећи циљ симулације је испитивање разних утицаја на већ познате моделе. Један пример за овакав случај је симулација понашања теоријски решених група канала под утицајем поновљених позива или неисправних ресурса.

На слици 4.1 је приказан процес симулације од планирања до решења проблема.



Сл. 4.1 Процес симулације.

У првом кораку се формулише проблем и специфицирају се својства система. Пошто је проблем описан, систем се анализира да би се добиле информације за његово моделирање. Пошто је модел направљен, следи његово превођење у неки програмски језик за извршавање на рачунару. Треба направити план потребних меморијских ресурса за складиштење података и програма, као и

времена израчунавања. Код извршавања симулације, посебно треба обратити пажњу на потребно време извршавања и број операција. Пошто се добију резултати симулације, врши се процена перформанси и анализа система. У овом кораку је најважније утврдити да су добијени резултати валидни. На основу ових резултата се систем процењује и анализира да би се постигао оптималан дизајн.

Симулација има вишеструке предности у односу на мерења, а овде ћемо издвојити неке од њих. Наиме, прва предност се огледа у могућности слободног избора модела, за разлику од мерења, које је само везано за постојећи уређај, који се тешко може мењати и постојећи саобраћај, на који се тешко може утицати. У симулационом процесу постоји слободан избор броја канала и величине саобраћаја. Мерење је везано за час главног оптерећења и тада мора и да се врши без обзира на могуће варијације вредности саобраћаја из дана у дан. За разлику од мерења, у симулационом процесу се може изабрати произвољна вредност за вредност саобраћаја у часу главног оптерећења, а симулациони процес може да се произвољно продужи.

Друга предност је краће трајање симулације у односу на поступак мерења тј. процеси долазака позива и опслуживања се знатно скраћују у симулационом поступку. Наиме, у симулационом поступку је могуће скалирати време.

Трећа предност симулације у односу на мерење је флексибилност и удобност поступка. Код мерења је потребно бити уз уређај као и поседовати опрему за мерење. Код симулације су само потребни програми за опонашање процеса позива и процеса опслуживања и програми за мерење саобраћајних својстава модела.

## **4.2 Симулација дискретних догађаја**

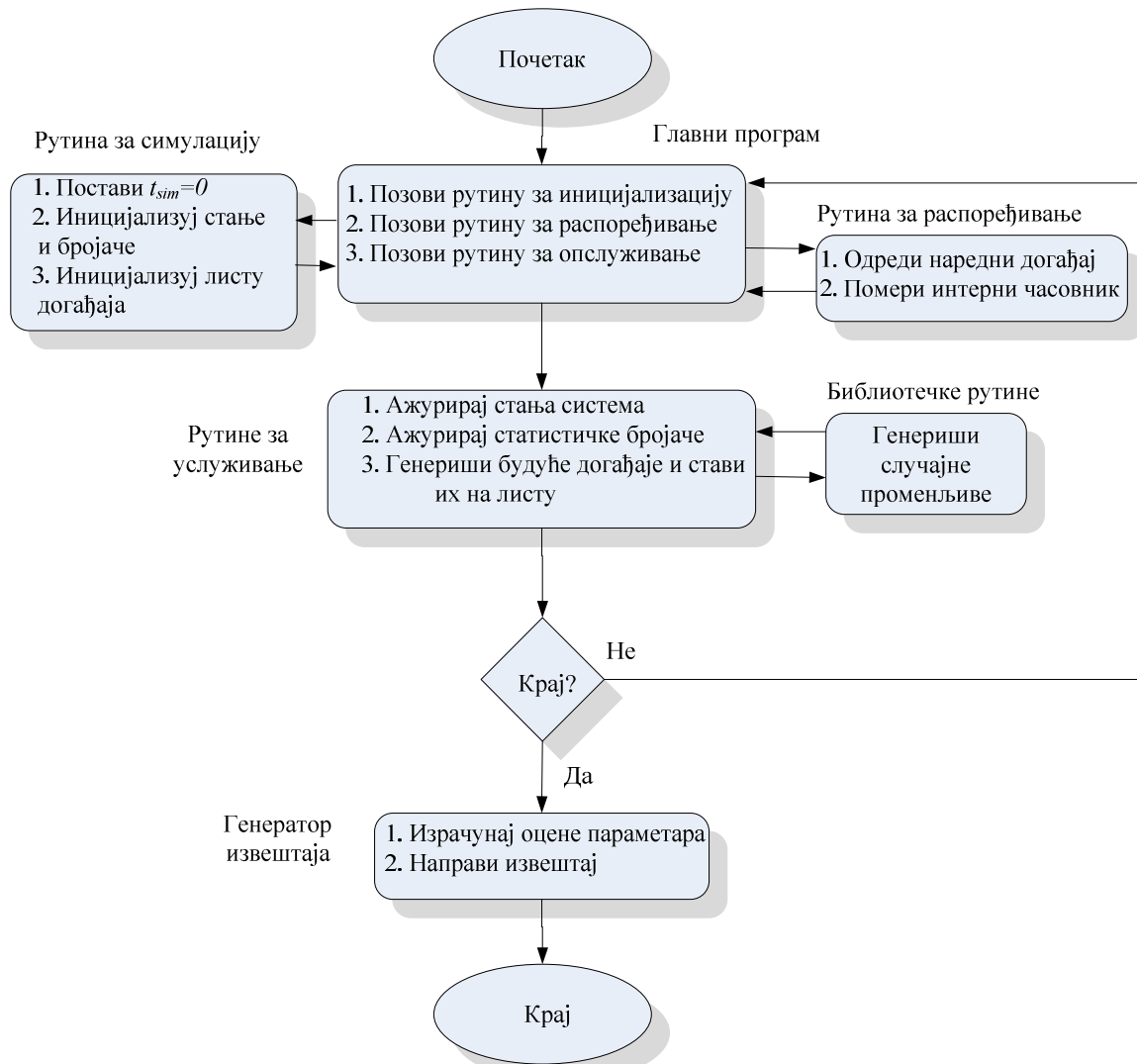
### *4.2.1. Организација симулације дискретних догађаја*

У општем случају постоје две врсте симулација: континуалне и дискретне. Континуална симулација подразумева да се променљиве стања континуално мењају у времену. Да би се континуални систем симулирао на дигиталном рачунару, потребно је извршити дискретизацију његовог модела. Симулација

саобраћаја која је од интереса у овом раду је дискретна врста симулације, односно дискретна стања (број позива) у систему се мењају услед процеса долазака и завршетака позива. Другим речима, систем за опслуживање позива моделира се тако да се догађаји дешавају у пребројиво много тренутака времена, зато се овакав вид симулације назива дискретна симулација.

Симулација се имплементира коришћењем програмских језика на рачунару. Одлике програмских језика за симулацију могу се сврстати у неколико категорија. Опште одлике су флексибилност у формирању модела, графички кориснички интерфејс, функционалност *debug*-ирања, брзина извршавања, могућност спрезања са другим програмима, услови коришћења и дистрибуирања и цена. Даља категоризација се може вршити према софтверским и хардверским захтевима. Најбитнија својства софтвера су статистичке функционалности које нуди, врста излазног извештаја и подршка графичком приказу резултата. Постоје две врсте програмских језика за симулацију: симулациони језици и програмски језици опште намене. За обе врсте програмских језика могу да се истакну предности и недостаци. Симулациони језици већ имају уграђене функције попут генератора случајних бројева, извршавања временских распореда, чувања података, статистичку анализу и конверзију излазног формата. С друге стране, програмски језици опште намене су флексибилнији и имају краће време извршавања. У програмске језике опште намене се убрајају језици попут *C/C++*, *Python*, *GNU Octave* итд. У симулационе језике се убрајају софтвери попут *GPSS/H*, *ns-3* итд.

Основна структура рачунарског програма за симулацију дискретних догађаја је приказана на слици 4.2 [57,60]. Током трајања симулације, ажурирају се подаци о симулационом времену, стању система и листи будућих догађаја, која садржи времена њиховог наступања. Организација програма је модуларна односно главни део програма је повезан са низом потпрограма (рутина).



Сл. 4.2 Организација симулације дискретног догађаја [60].

Рутина за иницијализацију поставља вредности симулационог времена, стања система, статистичких бројача и листе догађаја.

Рутина за распоређивање догађаја одређује временски редослед извршавања догађаја и помера симулациони часовник на тај тренутак.

Рутина за услуживање догађаја је потпрограм који обрађује догађаје односно ажурира стање система, статистичких бројача и листе догађаја када се деси одређени догађај.

Библиотечке рутине су математички потпрограми који генеришу случајне променљиве са задатом расподелом.



Генератор извештаја је потпрограм који по завршетку симулације прорачунава оцене параметара перформанси система на основу вредности статистичких бројача, и потом се прави извештај.

Главни програм повезује све остале програме у једну целину. Прво позива рутину за иницијализацију, потом циклично позива рутине за распоређивање и опслуживање догађаја. Потом проверава задовољеност услова за завршетак симулације и ако је овај услов испуњен, позива генератор извештаја и окончава симулацију.

Конкретно, програм за симулацију телефонског саобраћаја се може разложити на следеће компоненте:

- генератор псеудослучајних бројева
- интерни часовник,
- генератор новог позива,
- генератор завршетка везе,
- мерач и обрађивач измерених података.

Постоје три приступа за моделирање код дискретне симулације и засновани су на, догађају, процесу и активности.

Догађајем-оријентисано моделирање се заснива на формулисању симулационог модела описивањем промена стања услед догађаја као што су долазак позива или завршетак позива. Програмски језици опште намене се користе код овакве врсте моделирања.

Процесом-оријентисано моделирање описује понашање ентитета (позива) у систему. За описивање симулационих модела у овом случају се користе симулациони програмски језици.

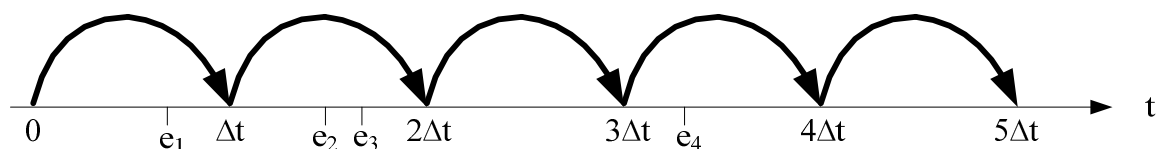
Активношћу-оријентисано моделирање описује временске тренутке почетка и завршетка активности попут трајања позива и заузећа канала. Овај метод је погодан за моделирање система код којих време чекања зависи од стања система (броја постојећих позива). Време извршавања је дуже него код догађајем-оријентисаног моделирање из разлога што се симулација врши скенирањем активности.

#### 4.2.2. Механизам помака времена

Време је незаобилазни чинилац у сваком процесу телекомуникационог саобраћаја без обзира на то да ли је тај процес реалан или симулиран. Основни показатељи ефикасности опслуживања су време опслуживања, време чекања и време блокаде. Према томе, мерење времена неопходан је услов у процесу симулације. Интерна јединица је време потребно за генерисање једног случајног броја. Мерење времена се врши тзв. интерним часовником (*internal clock*) који мери време у симулацији својим интерним јединицама времена. Интерни часовник је променљива која садржи тренутну вредност симулационог (интерног) времена, у коме је потпуно познато стање система у симулационом окружењу. У општем случају, интерни часовник се иницијализује на произвољну вредност, мада је то најчешће нулта вредност.

Код дискретне симулације је посебно важно обратити пажњу на механизам помака времена. Постоје два начина за помак симулационог времена: помак за константни прираштај и помак на наредни догађај [62].

Механизам помака времена за константни прираштај је приказан на слици 4.3. Интерни часовник се непрекидно инкрементира за константни интервал  $\Delta t$ .

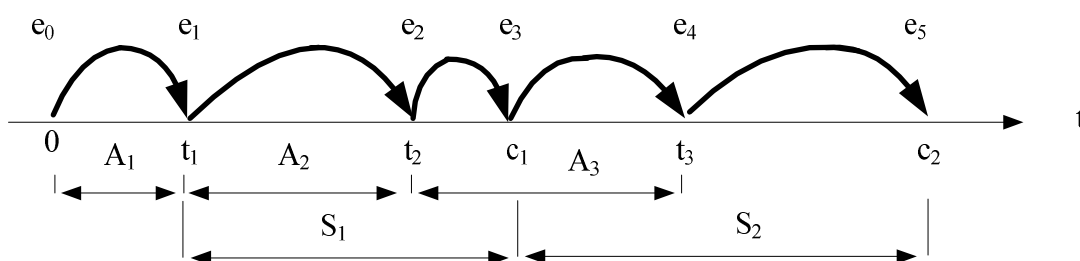


Сл. 4.3 Механизам помака за константни прираштај.

По ажурирању интерног часовника, проверава се да ли је било догађаја (означених са  $e_i$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$ ) током претходног интервала. Ако их је било, узима се да су се догађаји десили на крају претходног интервала, па се на основу тога ажурира стање у систему и статистички бројачи. Предност овог метода је једноставност имплементације. Недостаци су појава празног хода која одговара обради интервала без догађаја и унос грешке због померања догађаја на крају интервала. Посебан проблем је случај када се јави више догађаја у току једног интервала, јер треба одредити редослед обраде догађаја. Ови проблеми се могу

решити скраћењем интервала  $\Delta t$ , али се тиме повећава обим података за обраду и успорава се симулација.

Механизам помака времена на наредни догађај подразумева да се интерни часовник инцијализује на почетну вредност, да се одреде временски тренуци наступања будућих догађаја и да се потом интерни часовник постави на временски тренутак наступања првог догађаја. Пошто се интерни часовник инкрементира, догађај се обрађује. Другим речима, стање система, статички бројачи и временски тренуци наступања будућих догађаја се ажурирају. Тиме се решава проблем неактивних периода без догађаја, чиме је овај метод боље решење за примену у пракси. На слици 4.4 је приказан механизам помака на наредни догађај.



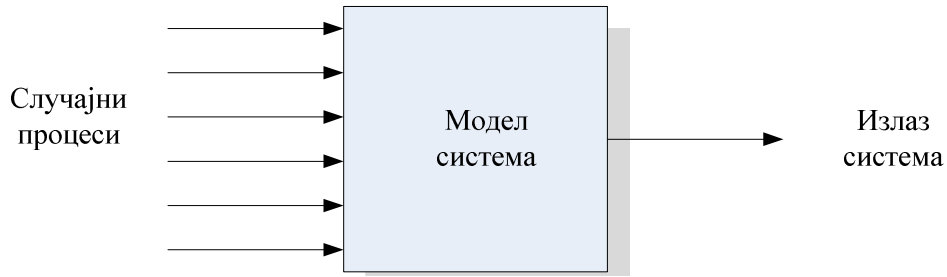
Сл. 4.4 Механизам помака на наредни догађај.

Са  $t_i$  је означен тренутак доласка  $i$ -тог корисника у систем;  $A_i = t_i - t_{i-1}$  је време између доласка корисника  $i - 1$  и  $i$ ;  $S_i$  је трајање обраде  $i$ -тог корисника,  $c_i$  тренутак његовог изласка из система, док је  $e_j$   $j$ -ти догађај.

### 4.3 Основи метода *Monte Carlo*

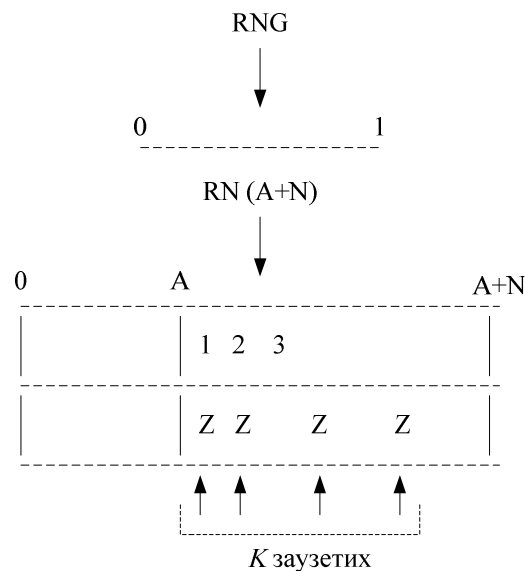
Метод симулације *Monte Carlo* је метод симулације који је добио име по коришћењу случајних бројева [59]. Овај метод се заснива на понављању симулираних случајних опита.

Уобичајено је да се имплементира тако што се систем који се анализира побуђује поворкама псеудослучајних бројева који представљају реалан процес на улазу система. Принцип *Monte Carlo* метода је приказан на слици 4.5.

Сл. 4.5 Принцип *Monte Carlo* метода.

Резултати симулације се оцењује неком од статистичких метода на основу излаза система. Овај метод може да се примени код анализе детерминистичких и стохастичких модела. Илустроваћемо како се на овај начин симулирају генерисање позива и раскидање везе.

Методом *Monte Carlo* може се показати да је задовољена основна особина догађаја у случајном процесу тј. одсуство меморије. На пример, нека се симулира савршени сноп са  $N$  канала коме је понуђен саобраћај  $A$ . Генеришу се бројеви из интервала  $(0, A+N)$  из генератора псеудослучајних бројева. На слици 4.6 је приказан принцип генерисања и прекидања везе. Подразумева се да се нови позив бира на случајан начин, као и прекид позива.



Сл. 4.6 Принцип генерисања новог позива и прекидања везе.

- Нови позив се генерише ако је извучен број између  $0$  и  $A$  и

- Завршетак везе на каналу чији је редни број  $j$ , наступа ако је извучен број између  $A+j-1$  и  $A+j$ ,  $j=1,2,\dots,N$ , ако је тај канал заузет. Ако  $j$ -ти канал није заузет у том тренутку, догађај се проглашава празним, односно нема последица у симулираном моделу.

Ако је у случајно одабраном тренутку у моделу који се симулира заузето  $k$  канала (стање  $\{k\}$ ), једноставно се може закључити да ће вероватноћа завршетка везе при извлачењу псеудослучајног броја бити

$$m_k = \frac{k}{A + N}, \quad (4.1)$$

а вероватноћа новог позива износи

$$l_k = l = \frac{A}{A + N}. \quad (4.2)$$

Јасно се може уочити да обе вероватноће као вероватноће основних догађаја у симулационом процесу зависе само од тренутног стања, односно не зависе од претходних стања групе. Може једноставно да се покаже да и у процесу симулације важи да је вероватноћа стања  $\{j\}$  односно вероватноћа да је заузето  $j$  канала дата *Erlang*-овом расподелом:

$$P_j = \frac{\frac{A^j}{j!}}{\sum_{i=0}^N \frac{A^i}{i!}} \quad (4.3)$$

Занимљиво је приметити да у овом случају расподеле вероватноћа, дужина трајања времена између позива и времена опслуживања немају негативну експоненцијалну расподелу.

Посматра се један заузети канал и узима се да је корак посматрања интервал времена ( $T_0$ ) потребан за генерисање једног случајног броја. Модел се посматра само у тренуцима генерисања новог случајног броја, односно у тренуцима промене који су целобројни умношци интерне јединице. Следи јасан закључак да се процес симулације догађаја одиграва у дискретном времену. То је један од разлога што се за расподелу дужине трајања времена између узастопних

догађаја не може узети негативно експоненцијална, јер је она везана за континуално време. Вероватноћа да позив који се посматра траје још само једну интерну јединицу односно још само  $T_0$  је једнака вероватноћи  $p$  да се извуче број који означава крај везе баш на том каналу и дата је изразом:

$$P_1 = \frac{1}{A + N} = p = 1 - q, \quad (4.4)$$

Вероватноћа да позив траје две интерне јединице је једнака производу вероватноће  $q$  да се прво извуче број који не изазива крај везе и вероватноће да се потом извуче број који изазива крај везе:

$$P_2 = \frac{A + N - 1}{A + N} p = qp. \quad (4.5)$$

Вероватноћа да позив траје  $n$  интерних јединица времена је:

$$P_n = pq^{n-1}. \quad (4.6)$$

Овај израз представља геометријску расподелу дужине трајања позива у процесу с дискретним временом. Геометријска расподела има особину беспослединости као и негативно-експоненцијална расподела код процеса у континуалном времену. Због ове особине, методом *Monte Carlo* је могуће опонашање случајних процеса у дискретном времену који се иначе догађају у континуалном времену и код којих су појаве одређене експоненцијалном расподелом.

Још један услов потребан да би симулација била верна стварном процесу гласи: вероватноћа настајања новог симулираног позива и вероватноћа прекида симулиране везе ( $l_k$  и  $m_k$ ) морају бити сразмерни коефицијентима рађања и умирања ( $\lambda_k$  и  $\mu_k$ ) процеса који се опонаша:

$$\frac{l_k}{\lambda_k} = \frac{m_k}{\mu_k}. \quad (4.7)$$

Претходну анализу генерисања случајних догађаја је могуће сумирати на следећи начин. Дакле, део програма за симулацију саобраћајног процеса и опслуживања који се односи на генерисање новог позива мора да буде усклађен са

процесом нових позива у опонашаном реалном процесу. Другим речима, мора да се води рачуна о интензитету позива и о његовој зависности од стања система. У случају *Erlang*-ове групе овај део не зависи од стања групе, док је код процеса који опонашају *Engset*-ову групу то супротно. Улога овог дела програма је генерисање нових позива независно од претходних догађаја односно да има особину одсуства меморије.

Један део симулационог програма има улогу генерисања завршетка заузимања канала односно генерисања завршетка везе. Мора се водити рачуна о броју заузетих канала и о случајности завршетка.

#### 4.4 Генератори случајних бројева и испитивање случајности

Случајни бројеви су бројеви чије стварање не зависи од претходних бројева. Постоје две врсте случајних бројева, аритметички и физички. Аритметички случајни бројеви су неслучајни бројеви с довољно великом периодом понављања и условно се могу сматрати случајним, тј. псеудослучајним. Оваква врста случајних бројева се генерише рачунарским путем. Физички случајни бројеви се генеришу, на пример, зрачењем гама честица са *Poisson*-овом расподелом и потпуно су случајни. Међутим, ови бројеви нису погодни за симулирање телекомуникационог саобраћаја због потешкоћа генерисања.

Случајност процеса долазака позива и њиховог опслуживања захтева постојање генератора случајних догађаја (*Random Number Generator*, RNG) тј. бројева којима се приписује значење појединих догађаја. Случајност бројева се огледа у независности генерисаног броја од претходно генерисаних бројева. То значи да не постоји периодичност понављања низа или делова низа случајних бројева код испитивања случајности низа правих случајних бројева.

Прави генератор случајних бројева није могуће реализовати рачунарским програмом. Могуће је програмски имплементирати генераторе псеудослучајних бројева тј. скоро случајних бројева. Потребни услови за псеудослучајне бројеве су:

- Може се генерисати довољан број случајних бројева,

- Довољно дуга периода понављања,
- Узастопно генерисање статистички истих случајних бројева и
- Статистичке особине одговарају циљевима симулације.

Периода понављања низа псеудослучајних бројева треба да буде веома велика у односу на низ случајних бројева који се користи за потребе неког процеса симулације; тиме је условно задовољен критеријум случајности. Наиме, ако је периода понављања низа псеудослучајних бројева за више редова величина већа од низа потребних случајних бројева, ова периодичност неће значајно умањити случајност генерисаног низа случајних бројева. Овде је битно и дати осврт на униформне случајне бројеве. Случајни бројеви са униформном расподелом се називају униформни случајни бројеви. Они се користе и за генерисање случајних бројева са произвољном расподелом. Постоје разни методи за генерисање униформних случајних бројева међу који треба истаћи мултипликативни конгруентни метод, линеарни конгруентни метод и метод  $M$  секвенци [58].

1) У Мултипликативном конгруентном методу (*Multiplicative Congruential Method*) полази се од серије случајних бројева  $x_0, x_1, x_2, \dots$ , која се добија рачунањем израза

$$x_n = kx_{n-1} \pmod{M}, \quad (4.8)$$

где  $\pmod{M}$  представља остатак дељења са  $M$ . Највећи период понављања  $2^{b-2}$  се добија за  $k = \pm 3 \pmod{8}$ ,  $x_0 = 1 \pmod{2}$  и  $M = 2^b$ .

2) Линеарни конгруентни метод (*Linear Congruential Method*) подразумева да се серија случајних бројева  $x_0, x_1, x_2, \dots$  добија рачунањем израза

$$x_n = (kx_{n-1} + \mu) \pmod{M}. \quad (4.9)$$

Највећи период понављања  $2^b$  се добија за  $k = \pm 3 \pmod{8}$ ,  $x_0 = 1 \pmod{2}$  и  $M = 2^b$ .

3) У Методу  $M$  секвенци (*M Sequence Method*), серија случајних бројева  $x_0, x_1, x_2, \dots$  се добија рачунањем израза



$$x_n = \sum_{i=1}^k c_i x_{n-1} \pmod{2}. \quad (4.10)$$

Највећи период понављања је  $2^k - 1$ , где је  $c_0, c_1, c_2, \dots, c_{k-1} = 0$  или  $1$ , и  $c_k = 1$ . Овај метод захтева одређени број узастопних рачунања за добијање случајног броја, пошто се по рачунању може генерисати само један. Иако на први поглед ово изгледа неповољно са становишта брзине, генерисање случајних бројева може да се убрза паралелним извршавањем логичких операција.

Такође је битно поменути *Mersenne Twister* алгоритам као веома распрострањен метод за генерисање псеудо случајних бројева [60]. Овај генератор одликује веома велика периода понављања и добре статистичке особине (случајност). Најчешће коришћени *Mersenne Twister* алгоритам заснива се на *Mersenne*-овом простом броју  $2^{19937} - 1$ .

Три су важне особине генератора случајних бројева: алгебарске (временске) одлике, статистичке одлике и рачунска сложеност алгоритма. Алгебарске одлике се односе на структуру и период генерисања секвенце, а статистичке одлике на расподелу вредности генерисане секвенце. Циљ је да се што једноставније генерише случајна секвенца која ће бити стационарна, некорелисана и максималног периода, дужег од трајања симулације.

Постоји велики број тестова за испитивање случајности генератора случајних бројева. Један који се може променити за испитивање случајности генерисаних униформних случајних бројева састоји се из следеће процедуре. Интервал бројева који даје генератор случајних бројева (најчешће од 0 до 1) се дели на  $k$  једнаких подинтервала, генератор случајних бројева се покрене, а генерисани бројеви се распоређују у одговарајуће подинтервале. Посматра се променљива:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(f_i - p_i)^2}{p_i}, \quad (4.11)$$

где су:

- $f_i$  теоријска вредност дела случајних бројева који падају у  $i$ -ти подинтервал,

- $p_i$  измерена вредност дела случајних бројева који падају у  $i$ -ти подинтервал.

Уколико генератор случајних бројева генерише бројеве који су у довољној мери случајни, односно независни један од другог, тада за генерисане случајне бројеве важи униформна расподела а величина  $\chi^2$  треба да задовољава ткз. „хи квадрат“ расподелу са  $k-1$  степеном слободе (овај тест се у литератури често назива *Pearson*-ов тест). Веома велика вредност величине  $\chi^2$  указује да расподела случајних бројева не подлеже униформној расподели, а сувише мала вредност величине  $\chi^2$  да је расподела случајних бројева униформна, али одређена неком интерном зависношћу, што је такође нежељено.

Други тест који се примењује за испитивање случајности генерисаних бројева заснива се на утврђивању броја низова узастопних случајних бројева који су већи (мањи) од средње вредности интервала. Упоређивањем добијеног броја узастопних бројева изнад (испод) половине интервала и учестаности њиховог појављивања с теоријским вредностима може се доћи до закључка о периодичности генерисаног низа. Тест за испитивање независности случајних бројева се заснива на посматрању низа узастопних бројева за које се израчунава аутокорелациона функција:

$$c_h = \frac{1}{N} \sum_{v=1}^N RN_v RN_{h+v}, \quad (4.12)$$

где је  $RN$  случајан број који се генерише.

Да би случајни бројеви били што “независнији” један од другог, аутокорелациона функција треба да следи нормалну расподелу.

Као тест корелисаности може да се користи и *Durbin-Watson*-ов тест [61]:

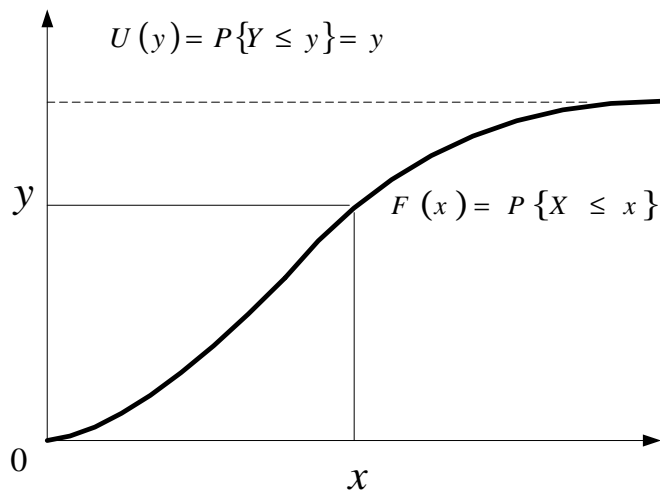
$$D = \frac{\sum_{n=2}^N [X(n) - X(n-1)]^2}{\sum_{n=1}^N X^2(n)}. \quad (4.13)$$

Ако су  $X(n)$  и  $X(n-1)$  некорелисани, добија се  $D = 2$ . Резултат  $D \ll 2$  указује на јаку позитивну корелисаност између елемената секвенце, док за  $D > 2$  постоји јака негативна корелисаност.

## 4.5 Генерисање случајне удаљености између мобилне и базне станице

Генерисање случајне удаљености између мобилне и базне станице (или било које друге случајне величине) је уско везано за генерисање произвољног случајног броја. Проблем који се јавља је непостојање општег метода за генерисање случајних бројева са произвољном расподелом. Наиме, потребно је изабрати одговарајући алгоритам у зависности од функције расподеле која се имплементира. Међу методима за генерисање произвољних случајних бројева издвајају се метод инверзне трансформације, метод одбацивања и метод композиције [58].

1) Метод инверзне трансформације (*Inverse Transform Method*) се заснива на алгоритму за генерисање случајног броја који има функцију расподеле  $F(\cdot)$  за коју постоји инверзна функција  $F^{-1}(\cdot)$ . Основни принцип метода је илустрован на слици 4.7.



Сл. 4.7 Принцип метода инверзне трансформације.

Ако се узме да је  $Y$  случајна променљива с униформном расподелом  $(0,1)$ , следи да је

$$U(y) = P\{Y \leq y\} = y, \quad 0 < y < 1. \quad (4.13)$$

Генерише се случајан униформни број и каже се да је

$$X = F^{-1}(Y). \quad (4.14)$$

Према томе,  $X$  има функцију расподеле  $F(x)$ . Ово се може се потврдити из релације,

$$P\{X \leq x\} = P\{F^{-1}(y) \leq x\} = P\{Y \leq F(x)\} = F(x). \quad (4.15)$$

2) Метод одбацивања (*Rejection Method*) разматра расподелу чија је функција густине  $f(x)$  ограничена. Претпоставља се да је  $A$  област између  $y = f(x)$  и  $x$  осе. На овај начин,  $x$  координата случајног узорка узетог из области  $A$  постаје случајан број са расподелом  $f(x)$ . Уводи се функција  $g(x)$  која је већа или једнака  $f(x)$ , и претпоставља се да случајна променљива има расподелу

$$\bar{g}(x) = C^{-1}g(x), \quad (4.16)$$

где је интеграл

$$C = \int g(x) ds \quad (4.17)$$

ограничен.

Случајни број са расподелом  $f(X)$  се генерише по следећем алгоритму:

- Генеришу се случајни бројеви  $X$  са расподелом  $\bar{g}(x)$  и  $Y$  са расподелом  $U(0,1)$ .
- Ако је  $Y > \frac{f(x)}{g(x)}$ , враћа се на поновно генерисање случајних бројева  $X$  и  $Y$ . У супротном,  $X$  је тражени случајни број.

Име овог метода долази из чињенице да се  $X$  одбацује док тачка која припада области  $A$  није изабрана. Ефикасност метода зависи од:

- Средње вредности броја одбијања ( $C - 1$ ) за добијање случајног броја,
- Брзине генерисања случајног броја са функцијом расподеле  $\bar{g}(x)$  и
- Процеса израчунавања  $\frac{f(x)}{g(x)}$ .

У циљу побољшања ефикасности, избор одговарајуће функције  $g(\cdot)$  је најбитнији. Ако функција густине није ограничена, одговарајућа ограничена функција густине се налази трансформацијом променљиве, и потом метод одбацивања може да се примени на ограничену функцију.

3) Метод композиције (*Composition Method*) је трећи метод за генерисање произвољних случајних бројева. Нека се претпостави се да је функција густине вероватноће  $f(x)$  изражена у интегралној форми као

$$f(x) = \int f(x, \theta)g(\theta)d\theta \quad (4.18)$$

где су  $f(x, \theta)$  и  $g(\theta)$  подинтегралне функције.

Ако се прво генерише случајан број  $\theta_0$  са расподелом  $g(\theta)$ , и потом случајан број  $x_0$  са расподелом  $f(x, \theta)$ , јасно је да  $x_0$  има расподелу  $f(x)$ . Ово се назива метод композиције и у пракси, ако је  $g(\theta)$  дискретна функција се користи формула

$$f(x) = \sum_k r_k f_k(x). \quad (4.19)$$

Ако се користе велике вредности за  $r_k$  који одговара функцији  $f_k(x)$  са нпр. униформном расподелом, случајни бројеви се генеришу ефикасно [58].

## 4.6 Обрада резултата симулације

Обрада резултата симулације се врши у посебном делу програма који у суштини није везан за сам симулациони процес. У овом делу програма се врше мерења појединих својстава модела и обрађују тако добијени резултати. Мерење својстава модела у симулационом процесу је слично мерењу саобраћаја у реалном процесу. Део програма задужен за обраду резултата добијених мерењем треба да покажу које вредности узима посматрана величина у појединим интервалима симулације.

Услови за завршетак симулације одређују колико дуго по уласку у устаљен режим се извршава симулација да би се добила веродостојна оцена параметара. Ови услови се дефинишу пре почетка симулације и могу бити системски и статистички.

Системски услови се заснивају на вредностима параметара симулационог окружења. Најчешће коришћени услов је задавање времена извршавања симулације. Према томе, унапред се зна колико ће симулација да траје, али се не зна колико ће случајних догађаја бити генерисано за задати временски период. То као последицу може имати несигурност у квалитет добијених резултата. Симулација се може завршити и када се реализује неки догађај, када систем уђе у задато стање или када статистички бројачи достигну задате вредности. Одлика ових приступа је да дају бољи увид у стање симулираног система у односу на временски приступ, али се не зна време трајања симулације.

Статистички услови се заснивају на задавању квалитета резултата. Симулација се завршава достизањем тражене прецизности оцене параметара система који се симулира. Статистички услови се задовољавају достизањем жељене вредности за апсолутну и релативну грешку излаза симулације.

У општем случају, са повећањем броја понављања у симулационом поступку, мењају се и функције густине вероватноће и средња вредност излаза симулације. Наиме, после довољно великог броја понављања, излаз симулације не зависи од почетних услова тј. наступа устаљени режим. Утицај почетних услова се урачунава у временском интервалу који се назива прелазни режим. Тежња је да систем што брже уђе у устаљени режим са становишта добијања веродостојних резултата. У статистичкој обради резултата се занемарује првих  $k$  одбирака који се односе на прелазни режим.

Битна ствар на који треба обратити пажњу је процена да ли добијени резултати симулације упадају у интервал поверења (*Confidence Interval*). Интервал поверења за параметар  $\theta$  са нивоом поверења  $1 - \alpha$  је интервал  $[Y_1, Y_2]$ , за који важи да је  $P(\theta \in [Y_1, Y_2]) = 1 - \alpha$ . Граница интервала поверења се рачуна груписањем резултата симулације у одговарајуће серије. Постоје разне методе за

рачунање граница интервала поверења међу којима су метод репликације, метод средње вредности низова и метод регенерације [58].

1) Метод репликације (*Replication Method*) је један од метода прорачун за интервал поверења. Изврши се одређени број независних симулација и за сваку серију репликација се врши оцена одговарајућег излазног параметра, а коначан резултат се добија усредњавањем ових добијених резултата по свим серијама. Тако се прорачуна интервал поверења и одбацују се резултати у почетном прелазном стању у зависности од следећих чинилаца:

- Симулација је почела од одређеног почетног стања користећи већ постојеће информације,
- Подаци пре унапред дефинисаног времена  $T$  се одбацују, почињући од празног почетног стања.

Иако за одређивање предефинисаног времена  $T$  треба да постоји тест, у општем случају се  $T$  одређује емпиријски. Ако су посматране вредности

$$X_1, X_2, \dots, X_n \quad (4.20)$$

за вредност  $X$  независне, интервал поверења  $[\mu_{\alpha}^+, \mu_{\alpha}^-]$  средње вредности  $\mu = E\{X\}$  са нивоом поверења  $(1 - \alpha)$  се рачуна на следећи начин:

Сматрајући да је  $\sigma^2$  варијанса случајне величине  $X$ , према централној граничној теореме, средња вредност одбирака:

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n X_i \quad (4.21)$$

има приближно нормалну расподелу  $N\left(\mu, \frac{\sigma^2}{n}\right)$ , са средњом вредношћу  $\mu$  и варијансом  $\frac{\sigma^2}{n}$  док  $n \rightarrow \infty$ . На основу централне граничне теореме може се одредити интервал поверења као:

$$\left. \begin{matrix} \mu_{\alpha}^+ \\ \mu_{\alpha}^- \end{matrix} \right\} = \bar{X} \pm \frac{\sigma}{\sqrt{n}} u_{\alpha/2} \quad (4.22)$$

где је  $u_{\alpha/2}$  вредност нормалне расподеле тако да је:

$$P\{X > u_{\alpha/2}\} = \frac{\alpha}{2}. \quad (4.23)$$

У општем случају је  $\sigma^2$  непозната величина, па се из резултата симулације оцењује варијанса одбирака:

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2. \quad (4.24)$$

У овом случају се уместо  $u_{\alpha/2}$  користи одговарајућа вредност  $t_{\alpha/2}^{n-1}$  од  $t$  расподеле са степеном слободе  $n - 1$ .

Добра страна овог метода је једноставност, а недостатак је што је потребан велики број понављања независних статистичких опита.

2) Метод средње вредности низова (*Batch Mean Method*) се заснива на принципу дељења  $n$  узорака добијених симулацијом у  $M$  серија са  $n' = \frac{n}{M}$  узорака; потом се на основу тих  $M$  серија рачунају средња вредност и интервал поверења. Узимајући да је  $X_{mi}$   $i$ -ти одбирок у  $m$ -тој серији, средња вредност у серији је дата са

$$\bar{X}_m = \frac{1}{n'} \sum_{i=1}^{n'} X_{mi}, \quad (4.25)$$

док је укупна средња вредност одбирака

$$\bar{X} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \bar{X}_m. \quad (4.26)$$

Број серија  $M$  треба да буде велики онолико колико прописује централна гранична теорема. У пракси је познато да је за  $n' > 25$  корелација између серија занемарљива, и да средња вредност серије  $\bar{X}_m$  приближно има нормалну расподелу  $N\left(\mu, \frac{\sigma^2}{n'}\right)$ , где је  $\mu$  средња вредност а  $\sigma^2$  варијанса од  $X$ . Стога се интервал поверења може израчунати као

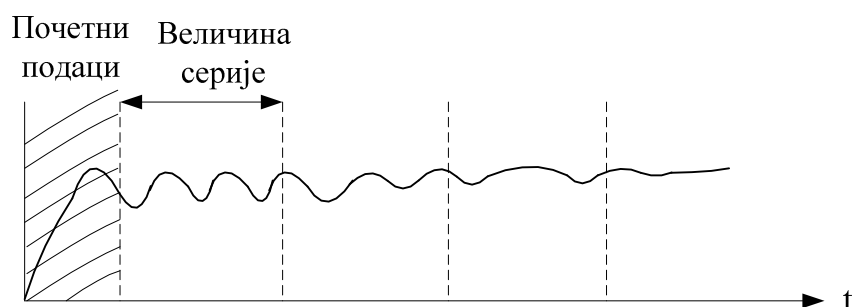
$$\left. \begin{matrix} \mu_{\alpha}^+ \\ \mu_{\alpha}^- \end{matrix} \right\} = \bar{X} \pm \frac{\sigma_m}{\sqrt{M}} u_{\alpha/2}, \quad (4.27)$$



где је  $\sigma_m^2$  варијанса од  $\bar{X}_m$ . Ако је  $\sigma_m^2$  непозната величина, користи се

$$S^2 = \frac{1}{M-1} \sum_{m=1}^M (X_m - \bar{X})^2 \quad (4.28)$$

где се вредност  $t_{\alpha/2}^{n-1}$  користи уместо  $u_{\alpha/2}$ . На слици 4.8 је приказан график уласка резултата симулације у стабилно стање.



Слика 4.8 Улазак резултата симулације у стабилно стање.

3) Метод регенерације (*Regenerative Method*) је трећи метод за прорачун интервала поверења. Стохастички процес  $\{X(t); t \geq 0\}$  се зове регенеративни процес, ако је независан од прошлости, у временским серијама  $\{t_n\}$  које се називају регенеративне епохе. Метод регенерације се заснива на принципу формирања серија између регенеративних епоха и веома је погодан за стохастичку анализу. Ове серије се третирају као независни низови на којима се оцењује очекивање. Треба рећи да постоје препреке за примену овог метода код практичних модела попут проблема одређивања регенеративне епохе.

## 4.7 Осврт на постојеће симулаторе мобилних мрежа

Ради комплетности излагања, у овом одељку је дат преглед постојећих симулатора мобилних мрежа. У општем случају, специјализовани симулациони језици се могу поделити на општенаменске језике и апликационо оријентисане језике. У даљем излагању су наведени различити симулациони језици са својим основним особинама.

GPSS/H (*General Purpose Simulation System*) спада у категорију општенаменског симулационог језика код кога се симулација врши у дискретном времену. Више о овом симулационом језику се може наћи у референци [63].

ns-2 (*Network Simulator-2*) је симулатор дискретних догађаја усмерен на анализу мрежа. Овај симулатор подржава TCP протокол, рутирање, као и различите врсте протокола код фиксних и мобилних мрежа. Пројекат његовог развоја започет је 1989. године. Овај мрежни симулатор спада у категорију слободног софтвера. Више о овом симулационом језику се може наћи у референци [64].

ns-3 (*Network Simulator-3*) је слободни софтверски алат за симулацију фиксних и мобилних мрежа. Спада у категорију апликационо оријентисаних симулационих језика. Пројекат његовог развоја започет је 2006. године. Циљ је био да се направи потпуно нови симулатор који би био једноставнији за коришћење и чији би код био конзистентнији од симулатора ns-2, па стога није ни била предвиђена међусобна компатибилност ових симулатора. Направљен је велики искорак у односу на симулатор ns-2 у смислу исправљених грешака у имплементацији механизма протокола, као и детаљније подршке за бежичне (мобилне) мреже. Једна од замерки за овај симулатор је компликован приступ прављења симулационих модела, односно није једноставан за учење. Више о овом симулационом језику може се наћи у референци [65].

GTNetS (*Georgia Tech Network Simulator*) је симулациони језик развијен да омогући симулацију мрежа за анализу понашања мрежа под различитим условима. Овај мрежни симулатор спада у категорију слободног софтвера. Ово окружење омогућава прављење топологија мрежа за симулацију и корисничких апликација које описују проток података кроз симулирану топологију. Више о овом симулационом језику се може наћи у референци [66].

SSFNet (*Scalable Simulation Framework Models*) претставља колекцију *Java* SSF-заснованих компоненти за моделирање и симулацију интернет протокола и мрежа на нивоу *IP* пакета и нивоа изнад. Пројекат развоја овог симулатора је

започет 1989. године. Овај мрежни симулатор спада у категорију слободног софтвера. Више о њему се може наћи у референци [67].

OPNET (*Optimized Network Engineering Tool*) је софтверски алат за анализу перформанси рачунарских мрежа и апликација. Спада у категорију комерцијалних програма. Више о овом софтверском алату може се наћи у референци [68].

NetSim (*Network Simulator*) је симулатор стохастичких дискретних догађаја развијен од стране компаније *Tetcos*, у сарадњи са Институтом за науку у Индијани. Прва верзија овог симулационог софтвера се појавиле 2002. године. Ово је веома популаран алат за симулацију мрежа и користи се у експерименталне и истраживачке сврхе. Подржане су различите врсте технологија попут WLAN, TCP/IP, WiMAX итд. Више о овом софтверском алату се може наћи у референци [69].

OMNeT++ је модуларни симулациони фрејмворк за развој симулатора мрежа. У овом контексту се подразумева мрежа у ширем смислу, дакле, и жичне и бежичне телекомуникационе мреже. Више о овом софтверском алату може се наћи у референци [70].

## **5. Прорачун излазне снаге базне станице**

## 5.1 Увод у анализу излазне снаге базне станице

### 5.1.1 Полазне претпоставке и хипотезе

Модел потрошње базне станице (потрошња RF дела и дела за обраду у основном опсегу) дефинисан у пројекту OPERA-Net, дат је следећим изразом [71]:

$$P_{BS} = n \cdot P_P + m \cdot P_{TRX} + \frac{\sum_{i=1}^m k_i \cdot P_{RFi}}{c}, \quad (5.1)$$

где су:

$P_{BS}$  – снага RF дела базне станице;

$P_P$  – снага дела за дигиталну обраду сигнала;

$P_{TRX}$  – фиксна снага потрошње сектора;

$P_{RFi}$  – Максимална RF снага сектора;

$n$  – инкремент снаге блока за дигиталну обраду;

$m$  – број сектора;

$k_i$  – део RF снаге који се израчи (фактор оптерећења сектора);

$c$  – DC/RF фактор конверзије;

Фактор оптерећења  $k_i$ , представља део максималне RF снаге који се предаје антени базне станице. Његова вредност је увек већа од нуле, због емисије потребне за ВССН носилац. Фактор оптерећења је параметар који зависи од интензитета саобраћаја, и из тог разлога је веома битна оптимизација вредности ове величине због смањивања потрошње базне станице. Према томе, моделирање овог фактора у зависности од интензитета саобраћаја, просторне расподеле корисника, слабљења сигнала и ограничености броја корисника био је један од главних циљева ове докторске дисертације.

Прорачун укупне снаге базне станице или снаге једног канала је у општем случају сложен проблем. У циљу поједностављења анализе, уводе се претпоставке које, не треба да значајније утичу на квалитет решења, а тај утицај је касније могуће урачунати у резултате. На основу уведених претпоставки се врши

прорачун расподеле вероватноће снаге једног саобраћајног канала на коме је примењена динамичка контрола снаге. Потом, израчунава се допринос снаге једног саобраћајног канала укупној средњој снази базне станице, као и расподела вероватноће укупне средње снаге саобраћајних канала базне станице. Претпоставке које надаље буду уведене, користеће се како у теоријској анализи, тако и у симулацији.

**Претпоставка 1:** Узима се у разматрање једна BTS са динамичком контролом снаге у GSM мрежи. Мрежа користи FDMA (*Frequency Division Multiple Access*) и TDMA (*Time Division Multiple Access*), који су имплементирани на свакој од фреквенција. Број фреквенција (ТСН канала) које користи једна BTS је  $N_f$ , а број временских канала које користи једна фреквенција је  $N_s (=8)$ . Број канала који се користе за реализацију везе,  $N_t$ , незнатно је нижи од укупног броја канала, ( $N_t < N_c = N_f \cdot N_s$ ), зато што се неки од канала користе за сигнализацију. Претпоставља се да свака веза заузима један канал, осим у случају унутарћелијског саобраћаја када се заузимају два канала. Понуђени саобраћај за саобраћајне канале у BTS је  $A$ .

**Претпоставка 2:** Број корисника, односно мобилних станица (MS) у једној ћелији је  $N_{ms}$ , што је много веће од броја саобраћајних канала,  $N_{ms} \gg N_t$ . Ова претпоставка дозвољава коришћење Erlang-овог модела за прорачун броја заузетих канала. Вероватноћа губитка позива, као последица непостојања слободних канала, је  $B$ , а услужени саобраћај је  $Y=(1-B) \cdot A$ .

**Претпоставка 3:** Примењује се DTX (*Discontinuous Transmission*) метод, који доприноси да за време паузе у говору не буде емитовања носилаца ТСН канала у трајању једног временског слота, као и да се исто понавља за све време трајања паузе у говору; тиме се ефективно штеди енергија током пауза у говору. Претпостављајући да је време трајања паузе у говору једнако половини времена трајања разговора, за потребе аналитичког прорачуна се примена DTX метода не разматра директно, већ је усвојено да је потенцијално смањење средње снаге са примењеним DTX методом око 3 dB. У оквиру симулационог модела, утицај

DTX-a је урачунао.

**Претпоставка 4:** Тип модулације који се користи у GSM мрежи је GMSK (*Gaussian Minimum Shift Keying*). Овај тип модулације карактерише константна амплитуда, и непостојање фазног дисконтинуитета при промени фреквенције. Због ових особина средња снага сигнала је константна и има особину адитивности. То значи да је средња снага суме више носилаца модулисаних GMSK једнака суми појединачних средњих снага GMSK модулисаних носилаца.

**Претпоставка 5:** Средња излазна снага базне станице се дефинише као средња излазна снага у периоду корисног дела GSM слота. Одређивање расподеле излазне снаге базне станице се врши у часу највећег оптерећења.

**Претпоставка 6:** Утицај ВССН носиоца се узима као адитивна константа у моделирању и симулацији базне станице. Оправданост ове претпоставке се може сагледати на следећи начин. Улога ВССН носиоца је да буде референца за мобилне станице, које надзиру до 6 суседних ВССН носилаца за одређивање одговарајуће ћелије у процесу хендовера. Из тог разлога се сваки ВССН носилац емитује константном, максималном снагом класе којој припада базна станица.

**Претпоставка 7:** Примењен је алгоритам за алокацију радио канала (*Radio Channel Allocation*), који се заснива на додели приоритета ВССН радио каналу (*Prioritize VCCN TRX*). У случају када у ћелији постоји један ВССН носилац и један или више ТСН носилаца, када год постоји слободан саобраћајни канал на ВССН носиоцу, он се користи за опслуживање позива. Тиме се остварује уштеда енергије, пошто се сви временски слотови на ВССН носиоцу шаљу с максималном снагом, чак и када нема позива за опслуживање, када се слотови попуњавају лажним подацима (*Dummy Burst*).

**Претпоставка 8:** Користи се основни сервис преноса говора FR кодека (*Full-Rate speech codec FR-13kbit/s*), тј. један временски слот одговара једном саобраћајном каналу. Разматрање HR кодека (*Half-Rate speech codec HR-6,5kbit/s*), с двоструким

бројем корисника по слоту, може се урачунати као ефективно смањење средње снаге за 3 dB, у односу када се примењује FR кодек.

**Претпоставка 9:** У општем случају, у разматрање треба узети мобилност корисника. Једноставан начин за моделирање мобилних корисника би се заснивао на претпоставци да су њихове иницијалне позиције у временском тренутку  $t = 0$  дате *Poisson*-овим процесом, при чему се претпоставља да се корисници крећу независно, без интеракције. Нека се са  $d_i$  означи премештање мобилног корисника на локацији  $x_i$  после времена  $\Delta t$ . Ако се сви мобилни корисници помере за неко растојање  $d_i$  у току времена  $t$ , средња вредност кретања ће бити 0. По *Bartlett*-овој теореме [72], расподела скупа нових локација корисника  $\{x_i + d_i\}$  је опет *Poisson*-ова, под условом да су  $d_i$  међусобно независни помераји. То значи да је такав модел у основи једнак статичком случају. Стога ће се у даљем раду анализирати статички случај, који је статистички еквивалентан случају где се корисници крећу.

**Претпоставка 10:** Слично тумачење се може применити код процеса кретања корисника између ћелија услед хендовера. Под претпоставком да је број корисника у ћелији константан, односно, број улазака у ћелију је статистички једнак броју излазака из ћелије, средња снага базне станице ће остати непромењена услед хендовера. Као последица ових претпоставки, узима се да је кориснички саобраћај услед хендовера занемарљив.

**Претпоставка 11:** Утицај сигнализације (пренос сигнализационог садржаја преко FCSH, SCH, BCCH, CCCH, SDCCCH, RACH, PCH, AGCH канала) је урачунат у оквиру BCCH носилаца. Код успостављања везе се врши највећи део сигнализације, при чему је SDCCCH канал један од носилаца ове врсте саобраћаја. Даља сигнализација по успостави везе се врши краћом битом на саобраћајним каналима. Време трајања заузећа саобраћајног канала код успостављене везе је реда 30 до 50 пута веће него време сигнализације на SDCCCH каналу [73]. Следи закључак да је сразмерно томе и сигнализациони саобраћај на SDCCCH каналу мањи од корисничког саобраћаја на саобраћајном каналу. Стога се може сматрати



да је у општем случају утицај сигнализације у односу на кориснички саобраћај знатно мањи на расподелу излазне снаге базне станице. Утицај заузећа сигнализационих канала је урачунат у симулационом моделу у оквиру ВССН носиоца.

**Претпоставка 12:** Утицај GPRS (*General Packet Radio Service*) се не разматра у овој анализи. Пренос пакета интернетом се по правилу реализује преко ресурса 3G мреже, која се не разматра у овом истраживању.

**Претпоставка 13:** У општем случају, број носилаца по ћелији се креће од 1 до 16, а у случају синхроног фреквенцијског скакања (*synchronized frequency hopping*) и до 24 [50]. У највећем броју случајева у реалним ћелијама, овај број је мањи од 7 [74]. Такође, базне станице најновије генерације [75], подржавају од 4 до 6 носилаца по једном RF модулу (*multi-carrier and broadband technology*). У овом раду су дати примери за базне станице са 3 и 5 носилаца, односно до 24 и 40 саобраћајна канала.

Функција расподеле случајних променљивих ће се означавати са  $F$ . Рецимо да се разматра случајна променљива  $r$  и једна њена вредност  $x$ . Као што је познато, (кумулативна) функција расподеле вероватноће случајне променљиве  $r$ ,  $F_r(x)$ , представља вероватноћу да је случајна променљива  $r$  мања или једнака  $x$ :

$$F_r(x) = P\{r \leq x\}. \quad (5.2)$$

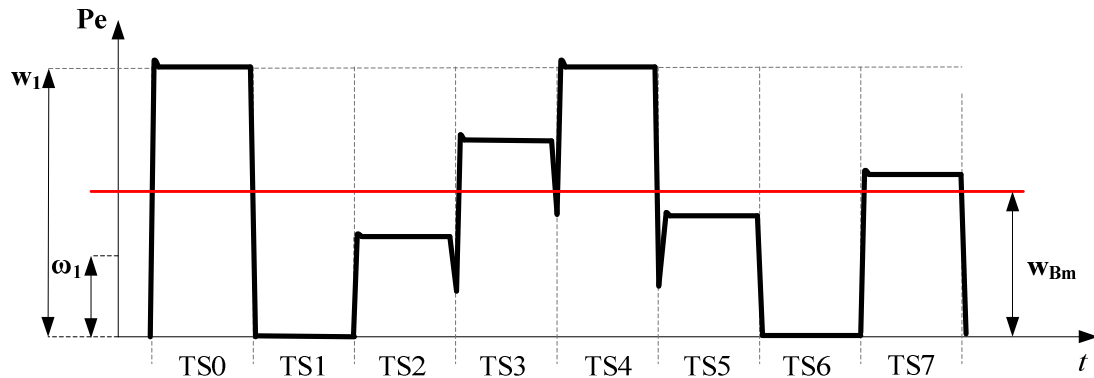
Функција густине вероватноће случајне променљиве  $r$  се означава са  $f_r(x)$  и за континуалне случајне променљиве, једнака је изводу функције расподеле вероватноће  $F_r(x)$ .

Излазна снага једног саобраћајног канала ( $w$ ) се дефинише као средња снага током корисног дела GSM блокова бита. Излазна снага једног саобраћајног канала,  $w$ , је случајна променљива; њена средња вредност је  $w_m$ , а максимална вредност је  $w_{max}$ .

Део снаге једног канала у оквиру укупне снаге,  $\omega$ , је  $1/8$  снаге канала  $w$  ( $\omega=w/8$ ). Средња вредност случајне променљиве  $\omega$  је  $\omega_m$ . Излазна снага BTS се означава са  $w_B$ , функција густине вероватноће (PDF) је  $f_{wB}(w)$ , кумулативна функција

расподеле (CDF) је  $F_{w_B}(x) = P\{w_B \leq x\}$ , средња вредност је  $w_{Bm}$  а највећа вредност је  $w_{Bmax}$ .

Средња излазна снага BTS,  $w_{Bm}$ , је сума средњих снага свих канала,  $w_{Bm} = \sum \omega_{im}$ ,  $i=1,2,\dots,N_f$ . На слици 5.1 је приказана излазна снага базне станице са 8 канала.



Сл. 5.1 Симболички приказ излазне снаге базне станице са 8 канала.

Надаље се уводе још неке претпоставке које олакшавају прорачун, али не смањују квалитет метода.

**Претпоставка 14:** Излазна снага BTS се подешава за све активне саобраћајне канале на свим фреквенцијама (изузев ВССН носиоца) на основу удаљености корисника.

**Претпоставка 15:** Мобилне станице су униформно расподељене у ћелији. Ћелија је круг полупречника  $R$  са базном станицом у центру.

**Претпоставка 16:** Излазна снага једног канала ( $w$ ) је случајна величина зависна од случајне удаљености, ( $d$ ), између MS и BTS.

Претпоставља се да излазна снага једног канала,  $w$ , зависи само од удаљености  $d$ , и ова зависност је исказана преко познате једнакости, [76]:

$$w = g(d) = a \cdot d^{\gamma} + b \quad (5.3)$$

где  $a$  представља константу (фактор) пропорционалности,  $b$  је константа која урачунава утицај минималне снаге базне станице, а вредност  $\gamma$  (фактор слабљења) узима вредности између 2 и 5 [76]. Очигледно следи да је  $w_{max} = a \cdot R^\gamma + b$ . Сматра се да је минимална снага базне станице,  $w_{min}$ , доња гранична вредност емисионе снаге базне станице без обзира на удаљеност мобилне станице, једнака разлици

$$w_{min} = w_{max} - 30 \text{ dB}. \quad (5.4)$$

Овај израз је последица чињенице да се емисиона снага саобраћајних канала за смер  $\text{BTS} \rightarrow \text{MS}$  може мењати у опсегу од 30 dB. Стога, ако се посматра класа 4 базне станице, што је у овом раду случај, добија се да је вредност минималне емисионе снаге базне станице,  $w_{min} = 40 \text{ mW}$ . Ова вредност је знатно мања од првог члана у једначини 5.2, па се стога може занемарити. Уведена апроксимација се може правдати тиме да се не умањује квалитет решења, а знатно се упрошћава прорачун.

Растојање између  $\text{BTS}$  и  $\text{MS}$ ,  $d$ , независна је случајна променљива чија је функција расподеле:

$$F_d(x) = P\{d \leq x\}, \quad (5.5)$$

и представља вероватноћу да је растојање мање или једнако некој вредности  $d$ . Ова претпоставка значи да је излазна снага једног саобраћајног канала континуална случајна величина (као и  $d$ ), што у пракси није у потпуности тачно, пошто се излазна снага мења у корацима од 2 dB. Густина расподеле случајне променљиве  $d$  се означава са  $f_d(x)$ .

Код аналитичког прорачуна се утицај снаге ВССН носилаца занемарује у првој апроксимацији. Разлог лежи у томе да се тиме знатно олакшава анализа и прорачун, а њен утицај се накнадно може урачунати у виду адитивне константе. Стога се може рећи да се у теоријском анализи разматрају само саобраћајни канали на које се примењује динамичка контрола снаге, што није случај са ВССН носиоцем, чија је снага константна и максимална за дату класу базне станице. У оквиру симулационог модела, допринос снаге ВССН носиоца се урачунава у расподелу излазне снаге базне станице.

## 5.2 Прорачун снаге једног канала базне станице

### 5.2.1. Средња снага, функција расподеле вероватноће и густина вероватноће излазне снаге једног канала

На основу анализе из претходног одељка, могуће је извести израз за средњу снагу по каналу. Уводи се претпоставка да је расподела корисника у ћелији униформна. Стога је CDF независне случајне променљиве  $d$  :

$$F_d(x) = \frac{\pi \cdot x^2}{\pi \cdot R^2} = \left(\frac{x}{R}\right)^2, \quad (5.6)$$

зато што је вероватноћа  $P\{d \leq x\}$  једнака односу површине круга са полупречником  $x$  и површине ћелије. Очигледно је да је функција расподеле случајне променљиве  $d$  :

$$f_d(x) = \frac{2 \cdot x}{R^2}. \quad (5.7)$$

Излазна снага једног канала,  $w$ , зависи од удаљености  $d$  и стога је јасно да је  $w$  зависна случајна променљива. Функција густине вероватноће (PDF) зависне случајне променљиве  $w$  може да се изрази помоћу густине вероватноће независне случајне променљиве  $d$  и једначине (5.3), [76]:

$$f_w(w) = \frac{1}{|g'(d)|} \cdot f_d(d) = \frac{2}{\gamma \cdot a \cdot R^2} \cdot \left(\frac{w}{a}\right)^{-\frac{\gamma-2}{\gamma}}, \quad (5.8)$$

те је стога CDF излазне снаге једног канала:

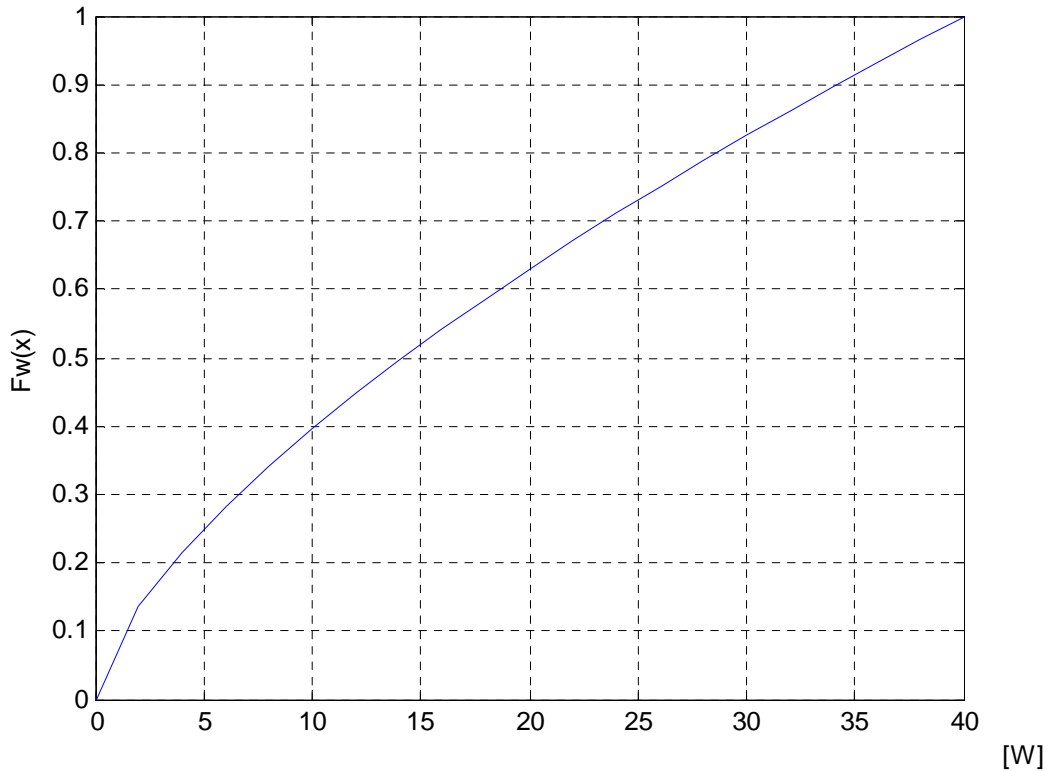
$$F_w(x) = \int_0^x f_w(w) \cdot dw = \frac{a^{-\frac{2}{\gamma}}}{R^2} \cdot x^{\frac{2}{\gamma}}. \quad (5.9)$$

Средња излазна снага једног канала је

$$\begin{aligned} w_m &= \int_{w_{min}}^{w_{max}} w \cdot f_w(w) \cdot dw = \frac{2 \cdot a}{(2 + \gamma) \cdot R^2} \cdot R^{2+\gamma} = \\ &= \frac{2}{2 + \gamma} \cdot w_{max}. \end{aligned} \quad (5.10)$$

Очигледно је да је  $w_m = 0.5 \cdot w_{max}$  за  $\gamma = 2$  и  $w_m < 0.5 \cdot w_{max}$  за  $\gamma > 2$ . На слици

5.2 је приказана расподела снаге једног канала базне станице.



Сл. 5.2 Функција расподеле излазне снаге једног канала.

Претходна анализа средње излазне снаге по каналу се може применити код конкретног нумеричког примера. Нека се претпостави да снага у једном каналу зависи од трећег степена растојања између MS и BTS:

$$w = g(d) = a \cdot d^3 \quad (5.11)$$

где је  $w_{max} = g(R) = a \cdot R^3$  највећа емисиона снага једног канала.

Као што је већ напоменуто, максимална излазна снага једног канала, која је део укупне излазне снаге BTS, је  $w_{max} = w_{max}/8$  (физички канал је подељен на 8 временских канала). Може се сматрати да је ова зависност добра апроксимација реалних пропагационих услова.

Густина вероватноће излазне снаге је, према [77], и једначини 5.11:

$$f_w(w) = \frac{1}{|g'(d)|} \cdot f_D(d) = \frac{1}{3 \cdot a \cdot \left(\frac{w}{a}\right)^{\frac{2}{3}}} \cdot f_D\left(\left(\frac{w}{a}\right)^{\frac{1}{3}}\right), \quad (5.12)$$

а CDF вероватноће излазне снаге једног канала

$$F_w(x) = \int_0^x f_w(w) \cdot dw = \frac{1}{R^2 \cdot a^{\frac{2}{3}}} \cdot x^{\frac{2}{3}}. \quad (5.13)$$

Средња излазна снага једног канала је

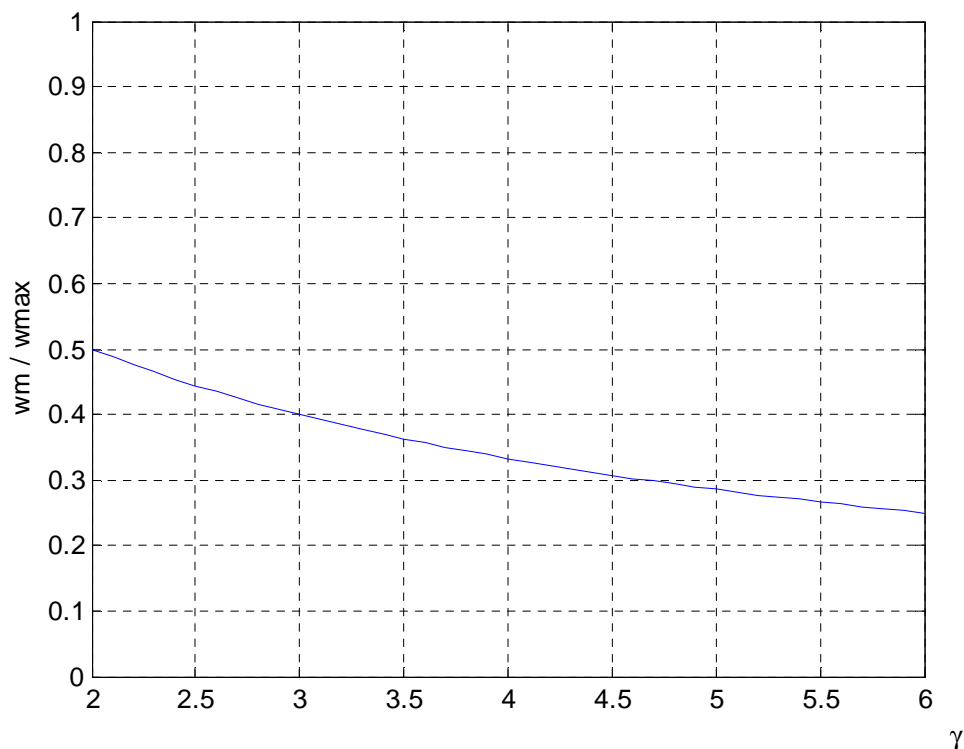
$$w_m = \int_0^{w_{max}} w \cdot f_w(w) \cdot dw = \frac{1}{5 \cdot R^2 \cdot a^{\frac{2}{3}}} \cdot w_{max}^{\frac{5}{3}}. \quad (5.14)$$

### 5.2.2. Зависност снаге једног канала од слабљења сигнала

Зависност средње излазне снаге једног канала од слабљења се видети из формуле

$$w_m = \frac{2}{2 + \gamma} \cdot w_{max} \quad (5.15)$$

На слици 5.3 је приказана зависност средње снаге једног канала од слабљења.



Сл. 5.3 Зависност средње снаге једног канала од слабљења.

У случају линеарне зависности слабљења, снага по канала износи 50% максималне снаге. Као што се види са графика, у реалном случају овај проценат је знатно мањи. У општем случају, фактор слабљења није константан у целој области ћелије. Постојање препрека у ћелији уноси додатно слабљење. У урбаној средини, зграде између базне станице и ивице ћелије уносе слабљење сигнала. У руралној средини брда и планине онемогућавају оптичку видљивост и утичу на слабљење сигнала.

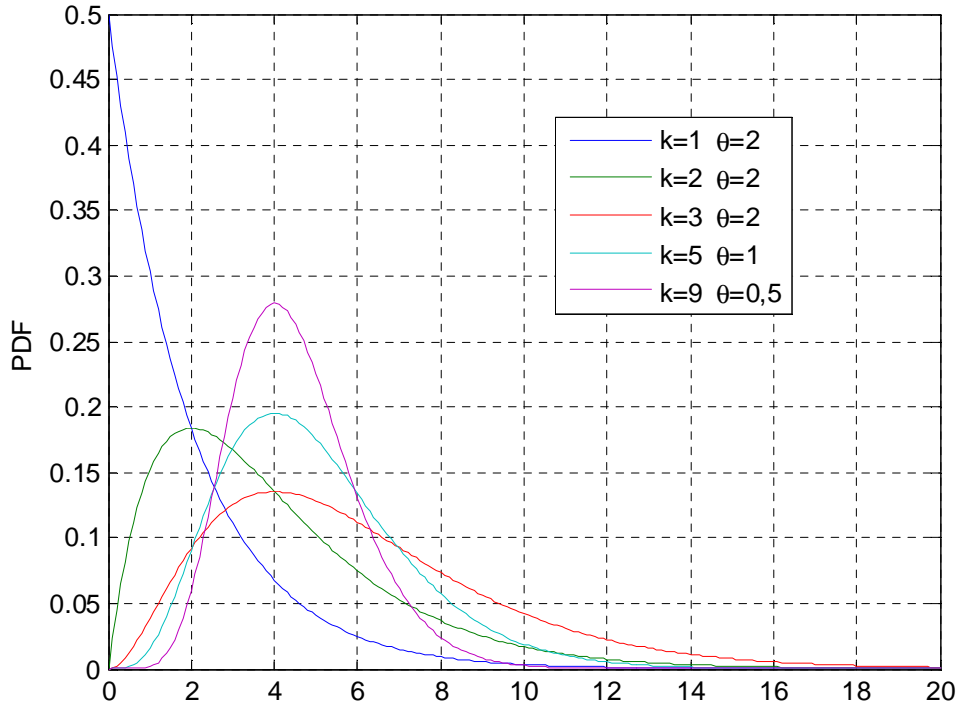
Могуће је увести генерализовану функцију, која због општости може моделирати произвољну зависност фактора слабљења од удаљености мобилне станице од базне станице. Нека се усвоји да функционална зависност фактора слабљења од удаљености мобилне од базне станице има гама расподелу. Гама расподела припада двопараметарској породици континуалних функција расподеле. Описана је параметром облика  $k$  и параметром скалирања  $\theta$ , и оба су позитивни реални бројеви. Функција густине вероватноће гама расподеле је

$$f(x; k, \theta) = \frac{x^{k-1} e^{-\frac{x}{\theta}}}{\Gamma(k)}, \quad (5.16)$$

где је са  $\Gamma(k)$  означена гама функција

$$\Gamma(k) = \int_0^{\infty} t^{k-1} e^{-t} dt. \quad (5.17)$$

На слици 5.4 је приказана гама расподела у зависности од параметара  $k$  и  $\theta$ .


 Сл. 5.4 Функција густине гама расподеле у зависности од параметара  $k$  и  $\theta$ .

На основу претходних једначина, функција густине вероватноће зависне случајне променљиве  $w$  може да се изрази на следећи начин:

$$f_w(w) = \frac{1}{|g'(d)|} \cdot f_d(d) = \frac{2}{aR^2Qd^{\frac{d}{\theta}} \Gamma(k)} \cdot \frac{d^{k-1} e^{-\frac{d}{\theta}}}{\Gamma(k)}, \quad (5.18)$$

где је

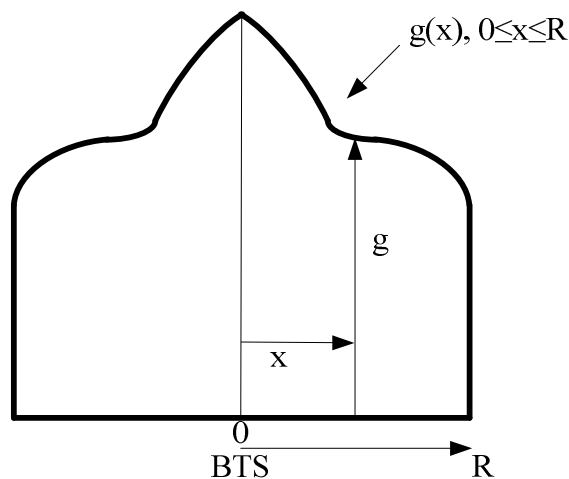
$$Q = \frac{e^{-\frac{d}{\theta}} d^{k-1} e^{-\frac{d}{\theta} + k - 2} (\ln(d)((k-1)\theta - d) + \theta)}{\theta}. \quad (5.19)$$

Прорачун CDF-а излазне снаге једног канала се заснива на једначини (5.9). У општем случају, овај интеграл нема аналитичко решење, или се, до њега тешко долази. Неретко се решавање интеграла овог облика своди на Lambert-ову функцију [57], па није могуће добити аналитичко решење.



### 5.2.3. Зависност излазне снаге једног канала од расподеле густине корисника у ћелији

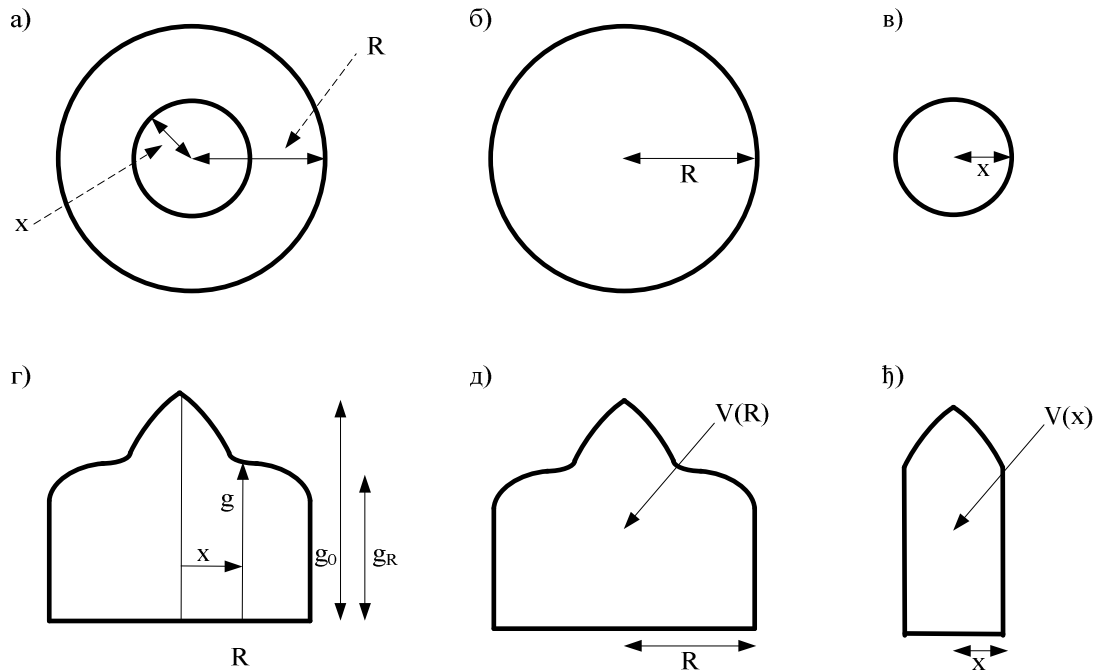
У овом одељку се разматра утицај неуниформне густине корисника на средњу снагу једног канала. Као што је већ напоменуто на почетку поглавља, број улазака корисника у ћелију статистички је једнак броју излазака из ћелије (занемарује се утицај саобраћаја услед хендовера). Густина мобилних станица (број мобилних станица по јединици површине ћелије) је означена са  $g$ . Усваја се претпоставка да је густина корисника континуално променљива величина која зависи само од удаљености од базне станице. Релативна густина корисника у ћелији се посматра као функција  $g = g(x)$  удаљености  $x$  мобилне станице од базне станице (слика 5.5).



Сл. 5.5 Неуниформна густина корисника у ћелији.

Одређивање густине расподеле случајне удаљености између мобилне и базне станице се може извршити на следећи начин. Посматра се однос броја мобилних станица удаљених мање од  $x$  од базне станице,  $N(x)$ , и укупног броја мобилних станица у ћелији,  $N(R)$ . Број мобилних станица у некој области је једнак производу густине мобилних станица у тој области и површине која се посматра. Овај производ се условно може изједначити са запремином тела изнад те области, а која је ограничена површином која се добија ротирањем функције која представља густину мобилних станица у ћелији. У посматраном случају је

однос бројева мобилних станица  $N(x)/N(R)$  једнак односу запремина  $V(x)/V(R)$  (слика 5.6).



Сл. 5.6 Профил густине корисника у хелији.

Вероватноће да је мобилна станица удаљена мање од  $x$  од базне станице, односно, функција густине удаљености,  $P(d < x) = F_d(x)$  је:

$$F_d(x) = \frac{V(x)}{V(R)}, \quad (5.20)$$

што се једноставно може израчунати као однос запремина обртних тела.

На овај начин може да се добије и густина расподеле случајног растојања између мобилне и базне станице, као  $f_d(d) = F'_d(d)$ , а на основу једначине (5.9) могуће је израчунати функцију густине,  $F_w(x)$ , и средњу вредност излазне снаге једног канала,  $w_m$ .

Утицај неуниформне густине корисника на излазну снагу базне станице се може показати на неколико нумеричких примера, где се разматра линеарно растућа, линеарно опадајућа и експоненцијална густина корисника у хелији.

- 1) Први случај се односи на линеарно опадајућу густину корисника са параметрима  $g_0 = 6, g_R = 1$  :

$$g(x) = g_0 - (g_0 - g_R) \frac{x}{R}. \quad (5.21)$$

Полазећи од једначина (5.9), (5.20) и (5.21), може да се изведе да је функција густине случајне удаљености,  $F_d(x)$ , и функција густине снаге једног канала,  $F_w(x)$ :

$$F_d(x) = \frac{3x^2 g_0 + \frac{2x^3(g_R - g_0)}{R}}{K}, \quad (5.22)$$

$$F_w(x) = \frac{A_1 \gamma x^{\frac{2}{\gamma}}}{2} + \frac{A_2 \gamma x^{\frac{3}{\gamma}}}{3}$$

где су:

$$A_1 = \frac{6g_0}{\gamma K a^{\frac{2}{\gamma}}}, A_2 = \frac{6(g_R - g_0)}{\gamma R K a^{\frac{3}{\gamma}}}, K = 2R^2 g_R + R^2 g_0 \quad (5.23)$$

За конкретне бројне вредности добија се:

$$F_d(x) = 2,25x^2 - 1,25x^3 \quad (5.24)$$

На крају се може израчунати средња снага једног канала као

$$w_m = \int_{w_{min}}^{w_{max}} w \cdot f_w(w) \cdot dw = \frac{A_1 \gamma w_{max}^{\frac{2+\gamma}{\gamma}}}{2+\gamma} + \frac{A_2 \gamma w_{max}^{\frac{3+\gamma}{\gamma}}}{3+\gamma}. \quad (5.25)$$

- 2) Други случај се односи на линеарно растућу густину корисника са параметрима  $g_0 = 1, g_R = 6$  :

$$g(x) = g_0 - (g_0 - g_R) \frac{x}{R}. \quad (5.26)$$

Функција густине случајне удаљености,  $F_d(x)$ , и функција густине снаге једног канала,  $F_w(x)$  дате су изразима:

$$F_d(x) = \frac{3x^2 g_0 + \frac{2x^3 (g_R - g_0)}{R}}{K}, \quad (5.27)$$

$$F_w(x) = A_1 \gamma x^{\frac{2}{\gamma}} / 2 + A_2 \gamma x^{\frac{3}{\gamma}} / 3,$$

где су:

$$A_1 = \frac{6g_0}{\gamma K a^{\frac{2}{\gamma}}}, A_2 = \frac{6(g_R - g_0)}{\gamma R K a^{\frac{3}{\gamma}}}, K = 2R^2 g_R + R^2 g_0. \quad (5.28)$$

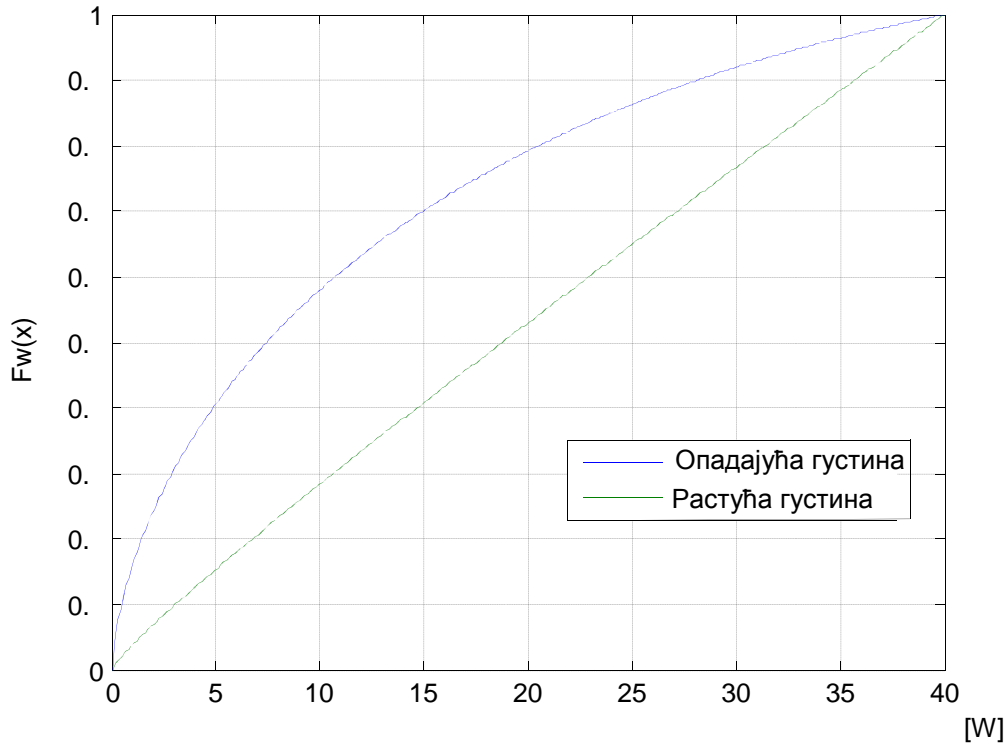
За конкретне бројне вредности добија се:

$$F_d(x) = 0,23077x^2 - 0,76923x^3. \quad (5.29)$$

На крају се може израчунати средња снага једног канала као

$$w_m = \int_{w_{min}}^{w_{max}} w \cdot f_w(w) \cdot dw = \frac{A_1 \gamma w_{max}^{\frac{2+\gamma}{\gamma}}}{2+\gamma} + \frac{A_2 \gamma w_{max}^{\frac{3+\gamma}{\gamma}}}{3+\gamma}. \quad (5.30)$$

За ( $w_{max} = 40W$ ,  $\gamma = 3$ ,  $R = 20 km$ ) добија се зависност приказана на слици 5.7.



Сл.5.7 CDF излазне снаге једног канала за опадајућу и растућу густину корисника.

- 3) Трећи случај се односи на експоненцијално опадајућу густину корисника од центра ћелије ка периферији са параметрима  $g_0 = 6, g_R = 1$ :

$$g(x) = g_0 e^{-bx} \quad (5.31)$$

Функција густине случајне удаљености,  $F_d(x)$ , и функција густине снаге једног канала,  $F_w(x)$  су:

$$F_d(x) = \frac{(bx + 1)e^{-bx} - 1}{(bR + 1)e^{-bR} - 1}, \quad (5.32)$$

$$F_w(x) = \frac{Ab^2}{\gamma a^{\frac{1}{\gamma}}} \int_0^x z^{\frac{2-\gamma}{\gamma}} e^{-\left(\frac{b}{a'}\right)z'} dz, \quad (5.33)$$

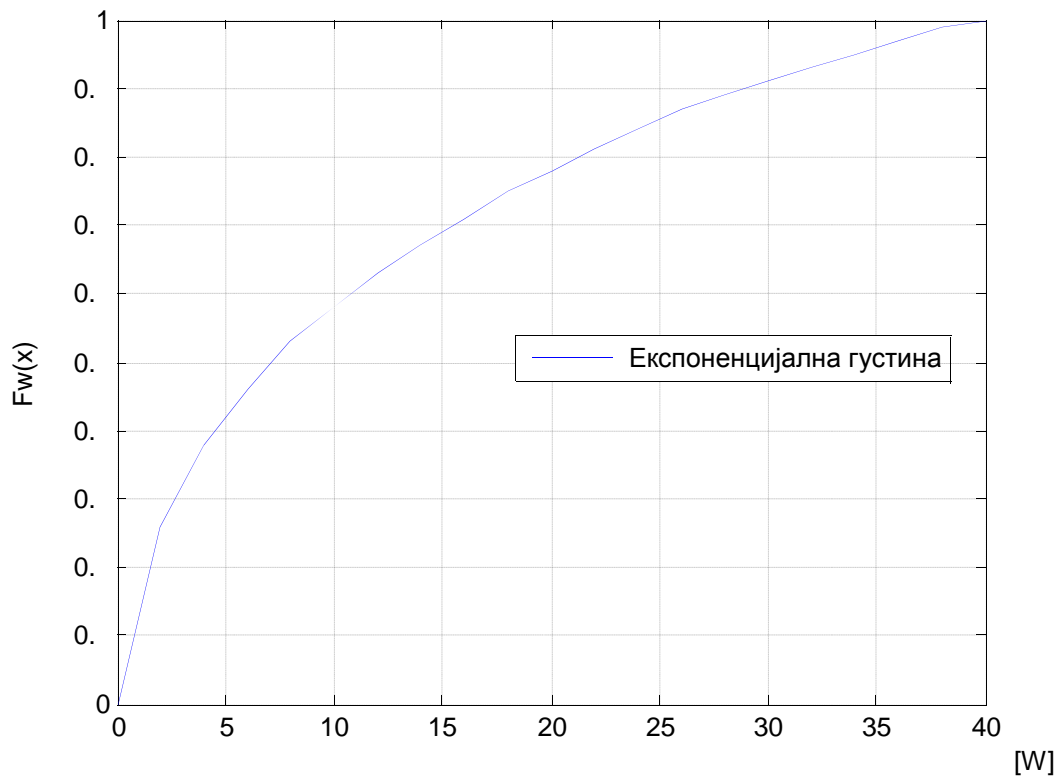
где су:

$$A = -\frac{1}{(bR + 1)e^{-bR} - 1}, \quad a' = a^{\frac{1}{\gamma}}, \quad z' = z^{\frac{1}{\gamma}}. \quad (5.34)$$

Одавде следи да је функција густине вероватноће удаљености MS-BTS

$$F_d(x) = 1,87(-(0,089588x + 1)e^{-0,089588x} + 1) \quad (5.35)$$

Нека се усвоје следећи параметри:  $\gamma = 3, R = 20 \text{ km}, w_{max} = 40 \text{ W}$ . На слици 5.8 је приказан CDF излазне снаге једног канала за експоненцијалну густину корисника.



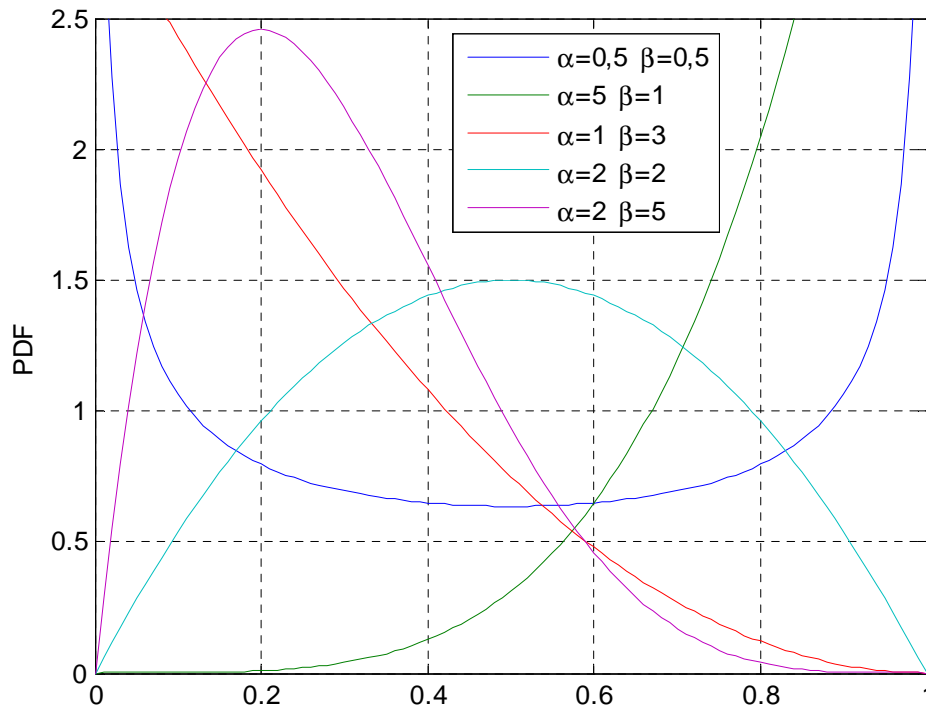
Сл.5.8 CDF излазне снаге једног канала за експоненцијалну густину корисника.

Да би се уопштила претходна анализа, погодно је увести генерализане функције, чијим је подешавањем параметара могуће моделирање различитих густина корисника у ћелији. Симулација неуниформне густине корисника у ћелији се може моделирати нелинеарним функцијама с више степени слободе. Утицај густине корисника на излазну снагу базне станице се у симулацији заснива на генерисању случајних бројева који могу имати произвољну функцију расподеле. Једна од расподела, која има довољно велики степен слободе да може моделирати различите густине корисника које наступају у појединим географских областима (урбаном, руралним, мешовитим) је бета расподела,  $Beta(\alpha, \beta)$ . Функција густине бета расподеле се може изразити као

$$f(x; \alpha, \beta) = \frac{x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1}}{\int_0^1 u^{\alpha-1}(1-u)^{\beta-1} du} = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1} = \quad (5.36)$$

$$= \frac{x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1}}{B(\alpha, \beta)}$$

где је  $0 < x < 1, \alpha > 0, \beta > 0$ ,  $\Gamma(\cdot)$  је гама функција, а бета функција  $B(\alpha, \beta)$  је нормализациона константа. На слици 5.9 је приказана бета расподела за различите вредности параметара  $\alpha$  и  $\beta$ .



Сл. 5.9 Функција густине бета расподеле у зависности од параметара  $\alpha$  и  $\beta$ .

У наредним нумеричким примерима, прорачунате су CDF излазне снаге једног канала и средња снага једног канала за различите вредности параметара  $\alpha$  и  $\beta$ . На овај начин је моделиран широк спектар густина корисника, које су у основи описане једном расподелом.

1) Први случај за бета расподелу који се анализира може да се сматра урбаноруралним моделом, с параметрима  $\alpha = 0,5, \beta = 0,5$ :

$$f(x; 0,5,0,5) = \frac{x^{-0,5}(1-x)^{-0,5}}{B(\alpha, \beta)} = \quad (5.37)$$

$$= \frac{x^{-0,5}(1-x)^{-0,5}}{\int_0^1 u^{-0,5}(1-u)^{-0,5} du}$$

Ова функција је због лакшег рачунања апроксимирана полиномом, и на основу једначина (5.9), (5.20) и (5.36), може да се изведе да је функција густине случајне удаљености,  $F_d(x)$ , и функција густине снаге једног канала,  $F_w(x)$  (слика 5.10, роза крива):

$$F_d(x) = \frac{a_1 \frac{x^8}{8} - a_2 \frac{x^7}{7} + a_3 \frac{x^6}{6} - a_4 \frac{x^5}{5} + a_5 \frac{x^4}{4} - a_6 \frac{x^3}{3} + a_7 \frac{x^2}{2}}{C}, \quad (5.38)$$

$$F_w(x) = \frac{1}{aC} \left( a_1 \frac{\left(\frac{x}{a}\right)^{\frac{8}{\gamma}}}{8} - a_2 \frac{\left(\frac{x}{a}\right)^{\frac{7}{\gamma}}}{7} + a_3 \frac{\left(\frac{x}{a}\right)^{\frac{6}{\gamma}}}{6} - a_4 \frac{\left(\frac{x}{a}\right)^{\frac{5}{\gamma}}}{5} + a_5 \frac{\left(\frac{x}{a}\right)^{\frac{4}{\gamma}}}{4} - a_6 \frac{\left(\frac{x}{a}\right)^{\frac{3}{\gamma}}}{3} + a_7 \frac{\left(\frac{x}{a}\right)^{\frac{2}{\gamma}}}{2} \right),$$

где су:

$$C = 936,5 \frac{R^8}{8} - 2501,7 \frac{R^7}{7} + 249,3 \frac{R^6}{6} - 1130 \frac{R^5}{5} + 223,9 \frac{R^4}{4} - 12,5 \frac{R^3}{3} + 0,05 \frac{R^2}{2},$$

$$a_1 = 936,5, a_2 = 2501,7, a_3 = 249,3, a_4 = 1130, \quad (5.39)$$

$$a_5 = 223,9, a_6 = 12,5, a_7 = 0,05.$$

2) Други случај може се сматрати урбано-руралним моделом (растућа густина), с параметрима  $\alpha = 5, \beta = 1$ :

$$\begin{aligned} f(x; 5,1) &= \frac{x^4}{B(\alpha, \beta)} = \\ &= \frac{x^4}{\int_0^1 u^4 du} = 5x^4. \end{aligned} \quad (5.40)$$

Функција густине случајне удаљености,  $F_d(x)$ , и функција густине снаге једног канала,  $F_w(x)$  (слика 5.10, тамно плава крива) су:



$$F_d(x) = \left(\frac{x}{R}\right)^6, \quad (5.41)$$

$$F_w(x) = \frac{a^{-\frac{6}{\gamma}} x^{\frac{6}{\gamma}}}{R^6}. \quad (5.42)$$

3) Трећи случај одговара руралном моделу (опадајућа густина), с параметрима  $\alpha = 1, \beta = 3$ :

$$\begin{aligned} f(x; 1,3) &= \frac{(1-x)^2}{B(\alpha, \beta)} = \\ &= \frac{x^4}{\int_0^1 (1-u)^2 du} = 3(1-x)^2. \end{aligned} \quad (5.43)$$

Функција густине случајне удаљености,  $F_d(x)$ , и функција густине снаге једног канала,  $F_w(x)$  (слика 5.10, црвена крива) дате су изразима:

$$F_d(x) = \frac{\frac{x^2}{2} - 2\frac{x^3}{3} + \frac{x^4}{4}}{C}, \quad (5.44)$$

$$F_w(x) = \frac{1}{aC} \left( \frac{\left(\frac{x}{a}\right)^{\frac{3}{\gamma}}}{3} - \frac{\left(\frac{x}{a}\right)^{\frac{4}{\gamma}}}{2} + \frac{\left(\frac{x}{a}\right)^{\frac{5}{\gamma}}}{5} \right), \quad (5.45)$$

где је:

$$C = \frac{R^2}{2} - 2\frac{R^3}{3} + \frac{R^4}{4}. \quad (5.46)$$

4) Четврти случај је урбано-рурални модел, с параметрима  $\alpha = 2, \beta = 2$ :

$$\begin{aligned} f(x; 2,2) &= \frac{x(1-x)}{B(\alpha, \beta)} = \\ &= \frac{x(1-x)}{\int_0^1 u(1-u) du} = 6x(1-x). \end{aligned} \quad (5.47)$$

Функција густине случајне удаљености,  $F_d(x)$ , и функција густине снаге једног канала,  $F_w(x)$  (слика 5.10, светло плава крива) су:

$$F_d(x) = \frac{\frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4}}{C}, \quad (5.48)$$

$$F_w(x) = \frac{1}{aC} \left( \frac{\left(\frac{x}{a}\right)^{\frac{3}{\gamma}}}{3} - \frac{\left(\frac{x}{a}\right)^{\frac{4}{\gamma}}}{2} \right), \quad (5.49)$$

где је:

$$C = \frac{R^3}{3} - \frac{R^4}{4}. \quad (5.50)$$

5) На крају, размотрићемо урбано-рурални модел, с параметрима  $\alpha = 2$ ,  $\beta = 5$ :

$$\begin{aligned} f(x; 2,5) &= \frac{x(1-x)^4}{B(\alpha, \beta)} = \\ &= \frac{x(1-x)^4}{\int_0^1 u(1-u)^4 du} = 109x(1-x)^4. \end{aligned} \quad (5.51)$$

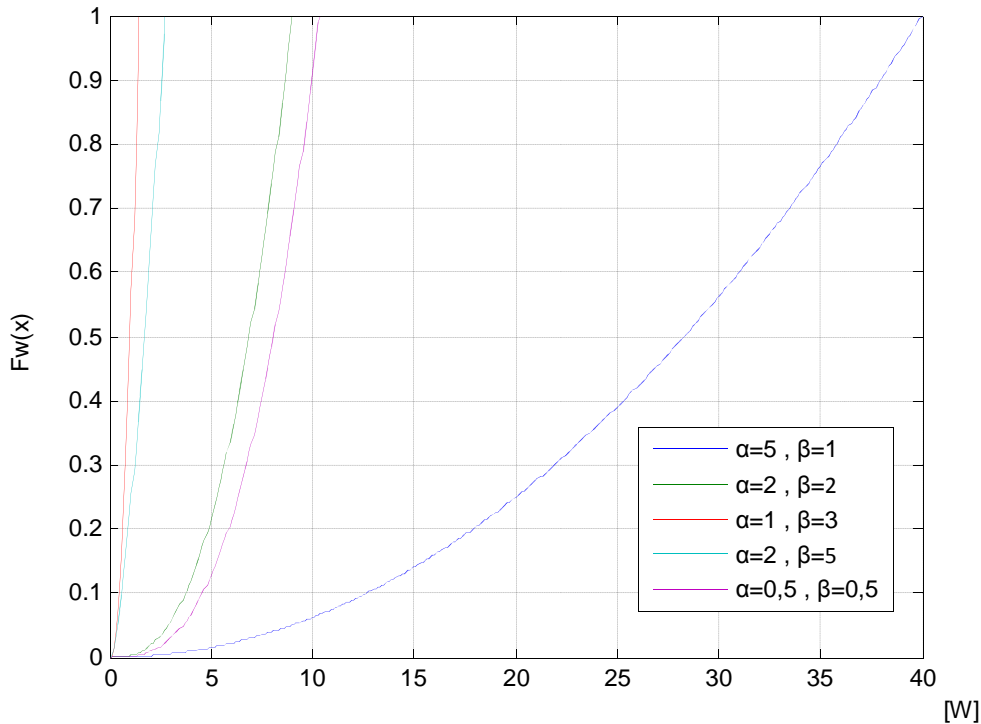
Функција густине случајне удаљености,  $F_d(x)$ , и функција густине снаге једног канала,  $F_w(x)$  (слика 5.10, зелена крива) дате су изразима:

$$F_d(x) = \frac{\frac{x^7}{7} - 2\frac{x^6}{3} + 6\frac{x^5}{5} - x^4 + \frac{x^3}{3}}{C}, \quad (5.52)$$

$$F_w(x) = \frac{1}{aC} \left( \frac{\left(\frac{x}{a}\right)^{\frac{7}{\gamma}}}{7} - 2\frac{\left(\frac{x}{a}\right)^{\frac{6}{\gamma}}}{3} + 6\frac{\left(\frac{x}{a}\right)^{\frac{5}{\gamma}}}{5} - \left(\frac{x}{a}\right)^{\frac{4}{\gamma}} + \frac{\left(\frac{x}{a}\right)^{\frac{3}{\gamma}}}{3} \right), \quad (5.53)$$

где је:

$$C = \frac{R^7}{7} - 2\frac{R^6}{3} + 6\frac{R^5}{5} - R^4 + \frac{R^3}{3}. \quad (5.54)$$



Сл. 5.10 Поређење CDF-а излазне снаге једног канала за различите вредности параметара  $\alpha$  и  $\beta$ .

Може се уочити да за случај растуће густине ( $\alpha = 5$ ,  $\beta = 1$ ) постоји скоро линеаран раст кумулативне функције ка максималним вредностима снаге, док за остале случајеве постоји тенденција акумулирања снаге канала на мањим снагама. То се посебно односи на случајеве ( $\alpha = 1$ ,  $\beta = 3$ ) и ( $\alpha = 2$ ,  $\beta = 5$ ) где је велики број корисника лоциран у непосредној близини базне станице.

Претходна анализа се односила на специфичне вредности параметара  $\alpha$  и  $\beta$  за које постоји решење у затвореном аналитичком облику. У општем случају, параметри  $\alpha$  и  $\beta$  су реални, и могу да узимају произвољне позитивне вредности, што као последицу има непостојање аналитичког решења. У том случају се користи симулациони поступак за одређивање CDF излазне снаге једног канала, средње снаге једног канала и CDF излазне снаге базне станице.

### 5.3 Прорачун укупне излазне снаге базне станице

#### 5.3.1. Средња вредност излазне снаге базне станице

Процена излазне снаге базне станице је проблем који обухвата удаљеност корисника од BTS, зависност излазне снаге једног радио канала од растојања MS-BTS и тренутног броја активних канала, односно тренутног саобраћаја. Процена излазне снаге BTS је успешна ако се добије зависност средње снаге или њена CDF од саобраћаја. Укупна излазна снага BTS,  $w_B$ , може се изразити преко средње вредности,  $w_{Bm}$ , преко функције густине вероватноће,  $f_{wB}(w)$ , и преко CDF-а,  $F_{wB}(x)$ . Излазна снага базне станице је непозната величина која се одређује статистичким методама у часу највећег оптерећења саобраћаја.

Средња вредност излазне снаге BTS једнака је суми средњих вредности снаге на сваком активном каналу, помножених фактором,  $\omega$ , који изражава део снаге једног канала у оквиру укупне снаге:

$$w_{Bm} = \sum_{k=1}^{N_t} k \cdot \omega \cdot w_m \cdot P(k, A, N_t). \quad (5.55)$$

где је променљива  $P(k, A, N_t)$  вероватноћа да је  $k$  канала заузето у групи од  $N_t$  канала с понуђеним саобраћајем  $A$ .

Према претпоставци о броју саобраћајних извора и броју канала,  $N_{ms} \gg N_t$ , може се користити Erlang-ов модел, односно одсечена Poisson-ова расподела,

$$P(k, A, N_t) = ERL(k, A, N_t) = \frac{\frac{A^k}{k!}}{\sum_{i=0}^{N_t} \frac{A^i}{i!}}, \quad k = 1, 2, \dots, N_t. \quad (5.56)$$

Пошто је

$$\sum_{k=1}^{N_t} k \cdot ERL(k, A, N_t) = Y = (1 - B) \cdot A, \quad (5.57)$$

опслужени саобраћај у групи од  $N_t$  канала с понуђеним саобраћајем  $A$ , средња излазна снага BTS се добија коришћењем једначина 5.55 – 5.57:

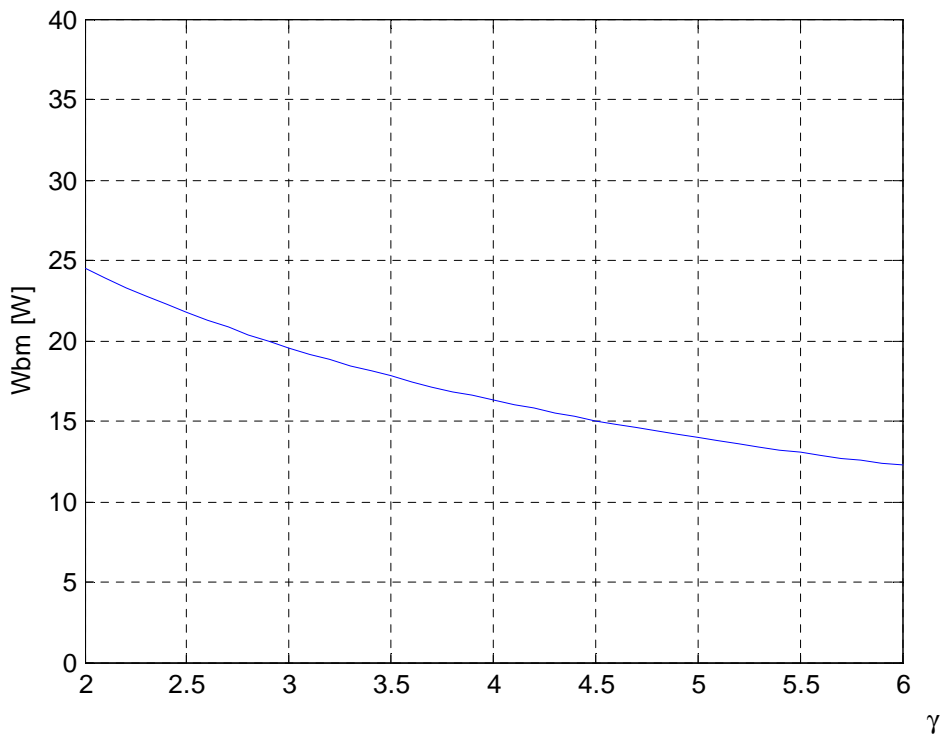
$$w_{Bm} = \omega_m \cdot A \cdot (1 - B). \quad (5.58)$$

### 5.3.2. Зависност излазне снаге од слабљења сигнала

Зависност излазне снаге базне станице од слабљења сигнала се може приказати на основу зависности средње снаге једног канала од слабљења сигнала. Према изразима 5.15 и 5.58, може се извести израз са средњу снагу базне станице у функцији фактора слабљења

$$w_{Bm} = \frac{2}{2 + \gamma} \cdot w_{max} \cdot A \cdot (1 - B). \quad (5.59)$$

На основу овог израза се веома једноставно може графички представити зависност средње снаге од слабљења сигнала у нормализованом облику, што је приказано на слици 5.11. Усвојени су следећи параметри:  $N = 16$ ,  $A = 10E$ ,  $w_{max} = 40W$ .



Сл. 5.11 Зависност укупне средње снаге од слабљења.

Теорија изложена у одељку 5.2.2. везана за случај када фактор слабљења зависи од удаљености, важи и код анализе укупне излазне снаге базне станице.

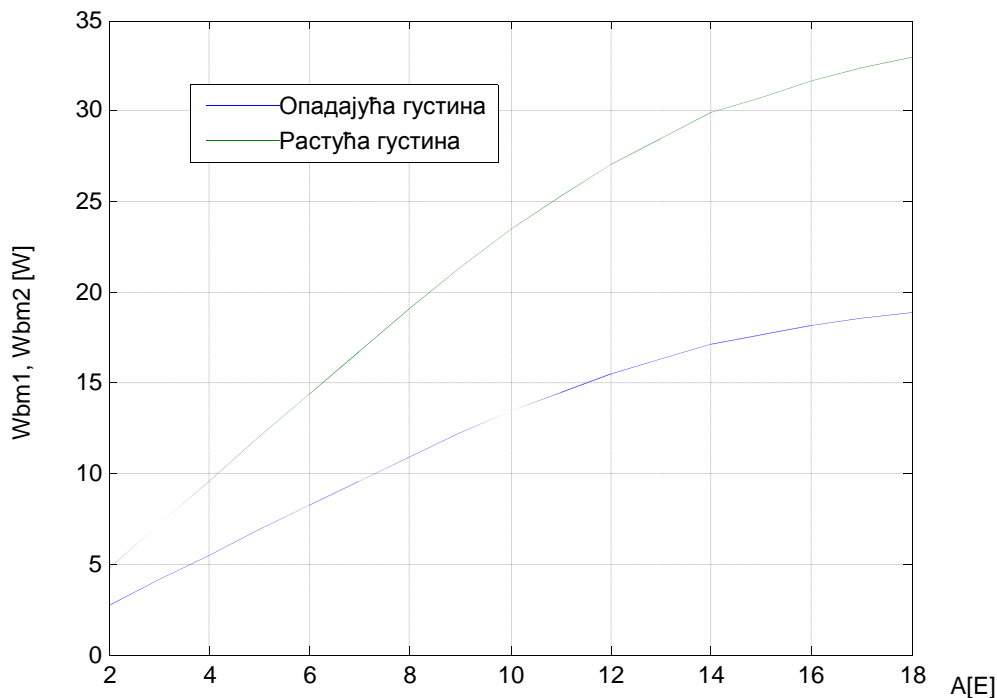
### 5.3.3. Зависност излазне снаге од расподеле густине корисника у хелији

Средња снага свих канала,  $w_{Bm}$ , може да се израчуна као производ опслуженог саобраћаја,  $Y$ , и средње снаге којој један канал доприноси укупној снази,  $\omega_m$ :

$$w_{Bm} = \omega_m \cdot Y = \omega_m \cdot A \cdot (1 - B), \quad (5.60)$$

где је  $\omega_m = w_m/8$ .

На основу израза за средњу снагу по каналу код монотono опадајуће и монотono растуће густине корисника добијених у одељку 5.1.3, могуће је одредити укупну излазну снагу базне станице. Усвајају се следећи параметри:  $N = 16, w_{max} = 40 \text{ W}, R = 20 \text{ km}, \gamma = 3$ . На слици 5.12 је приказана излазна снага базне станице у функцији саобраћаја за линеарно опадајућу густину корисника ( $g_0 = 6, g_R = 1$ ) и линеарно растућу густину корисника ( $g_0 = 1, g_R = 6$ ).



Сл. 5.12 Средње снага базне станице за линеарно опадајућу (плава крива) и линеарно растућу (зелена крива) густину корисника.

### 5.3.4. Зависност излазне снаге од унутарћелијског саобраћаја

Унутарћелијски саобраћај представља саобраћај између корисника у истој ћелији мобилне мреже. Одлика унутарћелијских веза је коришћење више ресурса за реализацију једног позива него у случајевима позива између различитих ћелија. Иако је у целој мрежи удео унутарћелијског саобраћаја мали у односу на целокупан саобраћај, у неким ћелијама које покривају једно место или предузеће, утицај унутарћелијског саобраћаја може бити значајан.

Погодни методи за прорачун саобраћаја у мрежи, у којој корисници за различите сервисе користе различити број ресурса представљени су у [55] и [79]. Ови методи се заснивају на мултидимензионалном моделу стања у групи ресурса. Број ресурса (канала) је  $N$ . Усвајају се следеће претпоставке:

- 1) Корисници могу припадати једној од  $k_z$  класа, у зависности од броја потребних ресурса. Корисник припада класи  $k_i$  ( $k_i = 1, 2, 3, \dots, k_z$ ) ако је потребно  $n_i$  ресурса за неки од сервиса. Број ресурса за једну везу  $n_i$  може бити број неопходних канала.
- 2) Ако је  $n_i$  ресурса потребно за један сервис, онда се они заузимају и ослобађају једновремено.
- 3) Саобраћајни процеси одговарајућих сервиса су међусобно независни.
- 4) Сваки ресурс (канал) може се користити за сваки од сервиса.
- 5) Вероватноћа блокирања (губитака) је дефинисана за сваки сервис односно класу. Вероватноћа блокирања за класу  $k_i$  ( $k_i = 1, 2, 3, \dots, k_z$ ) је вероватноћа да је број слободних ресурса (канала) мањи од  $n_i$ .
- б) Средња вредност блокирања може да се израчуна на основу вероватноће блокирања за сваку класу и понуђени саобраћај за сваку класу.

Група ресурса може да се нађе у једном од могућих мултидимензионалних стања  $\{j_1, j_2, \dots, j_i, \dots, j_z\}$  где  $j_i$  означава број ресурса заузетих од корисника из класе  $i$ . Стога је јасно да неједнакост  $j_1 + j_2 + \dots + j_i + \dots + j_z \leq N$  мора бити задовољена. Услед независности саобраћајних токова, случајни процес је реверзибилан, [55]. Ова чињеница поједностављује прорачун применом локалних баласних једначина.

Прорачун саобраћаја у ћелији са значајним уделом унутарћелијског саобраћаја је могућ тако да су одлазни и долазни саобраћај класификовани у једну класу сервиса, а унутарћелијски саобраћај у другу класу, пошто захтева двоструко више ресурса. Према томе, губици екстерних и унутарћелијских позива рачунају се као губици различитих класа. Средња вредност губитака може да се израчуна на основу ове две врсте губитака [79].

Прорачун излазне снаге базне станице, када утицај унутарћелијског саобраћаја није могуће занемарити, представља посебан проблем. Овај случај се веома често јавља у руралним подручјима где базна станица покрива цело насеље. Као и у претходним поглављима, узима се да је број саобраћајних канала  $N_t$ . Веза између два корисника у оквиру исте ћелије се зове унутарћелијска веза. Веза између корисника из различитих ћелија се назива екстерна веза. Јасно је да унутарћелијска веза заузима два канала, а екстерна веза један канал

Претпоставља се да је број корисника у ћелији велики, и да сваки корисник генерише релативно мали саобраћај. Понуђене везе (унутарћелијске и екстерне) чине *Poisson*-ове процесе. Понуђени унутарћелијски саобраћај је  $A_i$ , а понуђени екстерни саобраћај је  $A_e$ . Обе компоненте понуђеног саобраћаја су константне, односно не зависе од броја заузетих канала. Унутарћелијски и екстерни позиви су међусобно независни. Трајање позива за обе врсте саобраћаја је случајна величина са негативно-експоненцијалном функцијом расподеле. Стање  $\{i, e\}$  је стање у BTS где има  $i$  унутарћелијских и  $e$  екстерних веза. Вероватноћа стања  $\{i, e\}$  је означена са  $p(i, e, A_i, A_e, N_t)$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, T[N_t/2]$ ,  $e = 0, 1, 2, \dots, N_t$ , где је  $T[X]$  целобројни део позитивног реалног броја  $X$ , односно  $T[N_t/2] = N_t/2$  ако је  $N_t$  паран број и  $T[N_t/2] = (N_t - 1)/2$  ако је  $N_t$  непаран број. Пошто су унутарћелијски и екстерни саобраћај међусобно независни, вероватноће стања се могу добити у облику производа:

$$p(i, e, A_i, A_e, N_t) = \frac{A_i^i \cdot A_e^e}{i! \cdot e!} = \frac{A_i^i \cdot A_e^e}{i! \cdot e!} \cdot \frac{\sum_{j=0}^{2 \cdot j+k \leq N_t} \sum_{k=0}^{N_t-j} \frac{A_i^j \cdot A_e^k}{j! \cdot k!}}{\sum_{j=0}^{T[N_t/2]} \sum_{k=0}^{N_t-2 \cdot j} \frac{A_i^j \cdot A_e^k}{j! \cdot k!}} \quad (5.61)$$

где је  $i = 0, 1, 2, \dots, T[N_t/2]$ ,  $e = 0, 1, 2, \dots, N_t$ .

Јасно је да су две карактеристике ових расподела:



$$\lim_{A_i \rightarrow 0} p(i, e, A_i, A_e, N_t) = ERL(e, A_e, N_t) \quad (5.62)$$

$$\lim_{A_e \rightarrow 0} p(i, e, A_i, A_e, N_t) = ERL(i, A_i, T[N_t/2]) \quad (5.63)$$

где је  $ERL(j, A, N)$  вероватноћа да је  $j$  од  $N$  ресурса с понуђеним саобраћајем  $A$  заузето у *Erlang*-овом моделу са  $N$  канала.

Вероватноћа да је заузето  $j$  од  $N_t$  канала у групи са унутарћелијским и екстерним саобраћајем једнака је:

$$\begin{aligned} p(j, A_i, A_e, N_t) &= \sum_{2 \cdot i + e = j} p(i, e, A_i, A_e, N_t) = \\ &= \sum_{i=0}^{T[j/2]} p(m, j - 2 \cdot m, A_i, A_e, N_t) \end{aligned} \quad (5.64)$$

Вероватноћа губитака прве врсте је једнака вероватноћи да су сви канали заузети:

$$\begin{aligned} B_1 = P(N_t, A_i, A_e, N_t) &= \sum_{2 \cdot i + e = N_t} p(i, e, A_i, A_e, N_t) = \\ &= \sum_{i=0}^{T[N_t/2]} p(i, N_t - 2 \cdot i, A_i, A_e, N_t). \end{aligned} \quad (5.65)$$

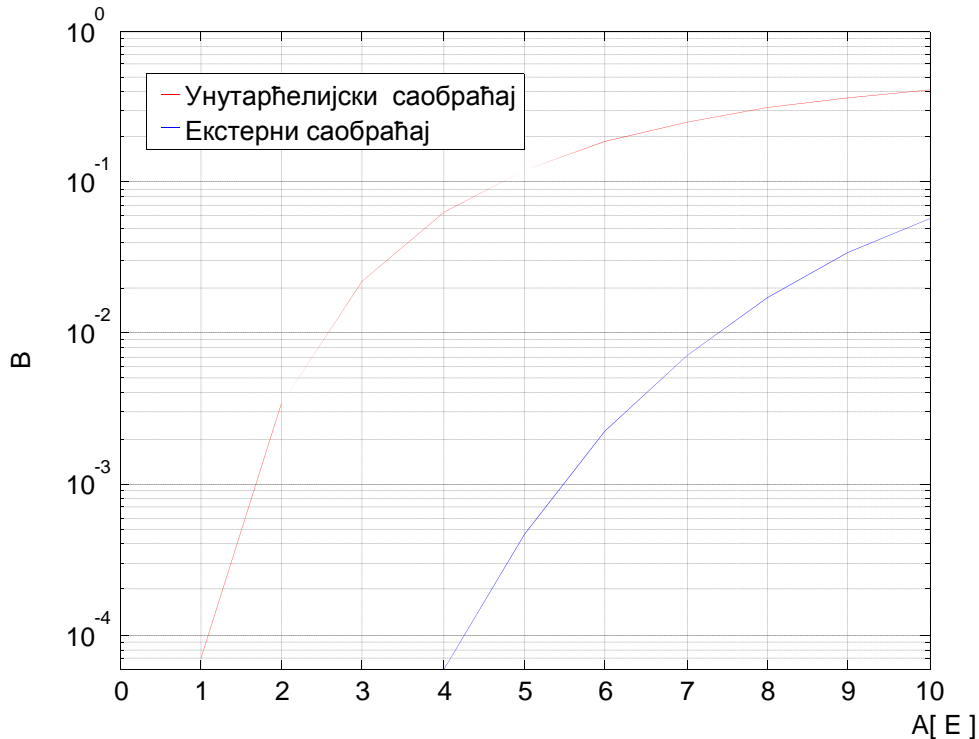
Вероватноћа губитака друге врсте је једнака вероватноћи да се унутарћелијске везе не могу успоставити, због постојања само једног слободног канала:

$$\begin{aligned} B_2 = P(N_t - 1, A_i, A_e, N_t) &= \sum_{2 \cdot i + e = N_t - 1} p(i, e, A_i, A_e, N_t) = \\ &= \sum_{i=0}^{T[N_t/2]} p(i, N_t - 2 \cdot i - 1, A_i, A_e, N_t). \end{aligned} \quad (5.66)$$

Вероватноћа губитака екстерних веза је  $B_e = B_1$  а вероватноћа губитака унутарћелијских веза је  $B_i = B_1 + B_2$ . Средња вредност саобраћајних губитака, односно вероватноћа да нека веза не може да се успостави због непостојања слободних канала је:

$$B = \frac{A_i \cdot B_i + A_e \cdot B_e}{A_i + A_e}. \quad (5.67)$$

Нека се сада у разматрање узму гранични случајеви када постоји само екстерни и само унутарћелијски саобраћај. За конкретне бројне вредности  $N_t = 14$ ,  $A \leq 10E$ , добијају се вероватноће блокирања приказане на слици 5.13.



Сл. 5.13 Вероватноћа губитка везе у граничним случајевима када постоји само унутарћелијски (црвена крива) и екстерни саобраћај (плава крива).

Унутарћелијска веза користи два канала, па је стога вероватноћа губитака позива услед компоненте унутарћелијског саобраћаја већа. Такође важи и супротно: ако је екстерна компонента већа, сервис је бољи. Поред повећања губитака као функције повећања унутарћелијског удела саобраћаја, може се видети да је повећање губитка позива и функција повећања броја канала у групи.

Код анализе излазне снаге базне станице где се утицај унутарћелијског саобраћаја мора узети у разматрање, резултати добијени у одељку 5.2.1 за случај ћелије са униформном расподелом не важе. У случају модела са унутарћелијским саобраћајем, средњи број заузетих канала је једнак средњем броју екстерних веза увећаним за удвостручен средњи број унутарћелијских веза.

Средњи број унутарћелијских веза у моделу са унутарћелијским саобраћајем, односно опслужени унутарћелијски саобраћај  $Y_i$  може се изразити као

$$Y_i = \sum_{k=1}^{T[N_t/2]} k \cdot p(k, A_i, A_e, N_t). \quad (5.68)$$

Вероватноћа да има  $k$  унутарћелијских веза, може се добити преко израза

$$p_i(k, A_i, A_e, N_t) = \sum_{e=1}^{N_t-2 \cdot k} k \cdot p(k, e, A_i, A_e, N_t). \quad (5.69)$$

Средњи број екстерних веза у моделу са унутарћелијским саобраћајем односно услужени екстерни саобраћај  $Y_e$ , може се изразити као

$$Y_e = \sum_{k=1}^{N_t} k \cdot p_e(k, A_i, A_e, N_t), \quad (5.70)$$

где је  $p_e(k, A_i, A_e, N_t)$  вероватноћа да има  $k$  екстерних веза

$$p_e(k, A_i, A_e, N_t) = \sum_{k=1}^{T[(N_t-k)/2]} p(i, k, A_i, A_e, N_t). \quad (5.71)$$

Очигледно је да је средњи број заузетих канала  $n_m$  једнак:

$$n_m = Y_e + 2 \cdot Y_i, \quad (5.72)$$

стога, када постоји унутарћелијски саобраћај, средња снага базне станице  $w_{Bmi}$  је:

$$w_{Bmi} = \omega_m \cdot n_m = \omega_m \cdot (Y_e + 2 \cdot Y_i). \quad (5.73)$$

Може се извести закључак да, када постоји унутарћелијски саобраћај ( $A_i > 0$ ), излазна снага је већа него у случају када постоји само екстерни саобраћај:

$$w_{Bmi} > w_{Bm} = \omega_m \cdot Y. \quad (5.74)$$

Веза између средње излазне снаге базне станице када унутарћелијски саобраћај постоји и када не постоји је:

$$\frac{w_{Bmi}}{w_{Bm}} = \frac{Y_e + 2 \cdot Y_i}{Y}. \quad (5.75)$$

Процент повећања снаге базне станице као последица постојања унутарћелијског саобраћаја, може се дефинисати као:

$$\Delta = 100 \cdot \frac{w_{Bmi} - w_{Bm}}{w_{Bm}}. \quad (5.76)$$

## **6. Симулациони модел базне станице**

## 6.1 Симулациони модел једног канала

Принцип симулације излазне снаге базе станице се заснива на *Monte Carlo* методу генерисања случајних бројева. Као што је речено у четвртом поглављу, не може се говорити о апсолутној случајности бројева. У рачунарским симулацијама бирају се бројеви који су псеудослучајни, односно чија је периода понављања довољно велика да се условно могу сматрати случајним. Према томе, избор генератора псеудо-случајних бројева је битан фактор код симулација процеса у телекомуникацијама. У овој дисертацији су разматрана три генератора псеудо-случајних бројева: линеарни конгруентни генератор [80], *Fibonacci*-јев генератор [80] и *Mersenne Twister* генератор [81]. У табели 6.1 су приказане предности и недостаци сваког од њих.

Табела 6.1 Поређење генератора псеудослучајних бројева.

Тип генератора	Линеарни конгруентни	Fibonacci	Mersenne Twister
Периода понављања	Средња	Велика	Велика
Случајност алгоритма	Ниска	Средња	Висока
Сложеност алгоритма	Мала	Велика	Велика

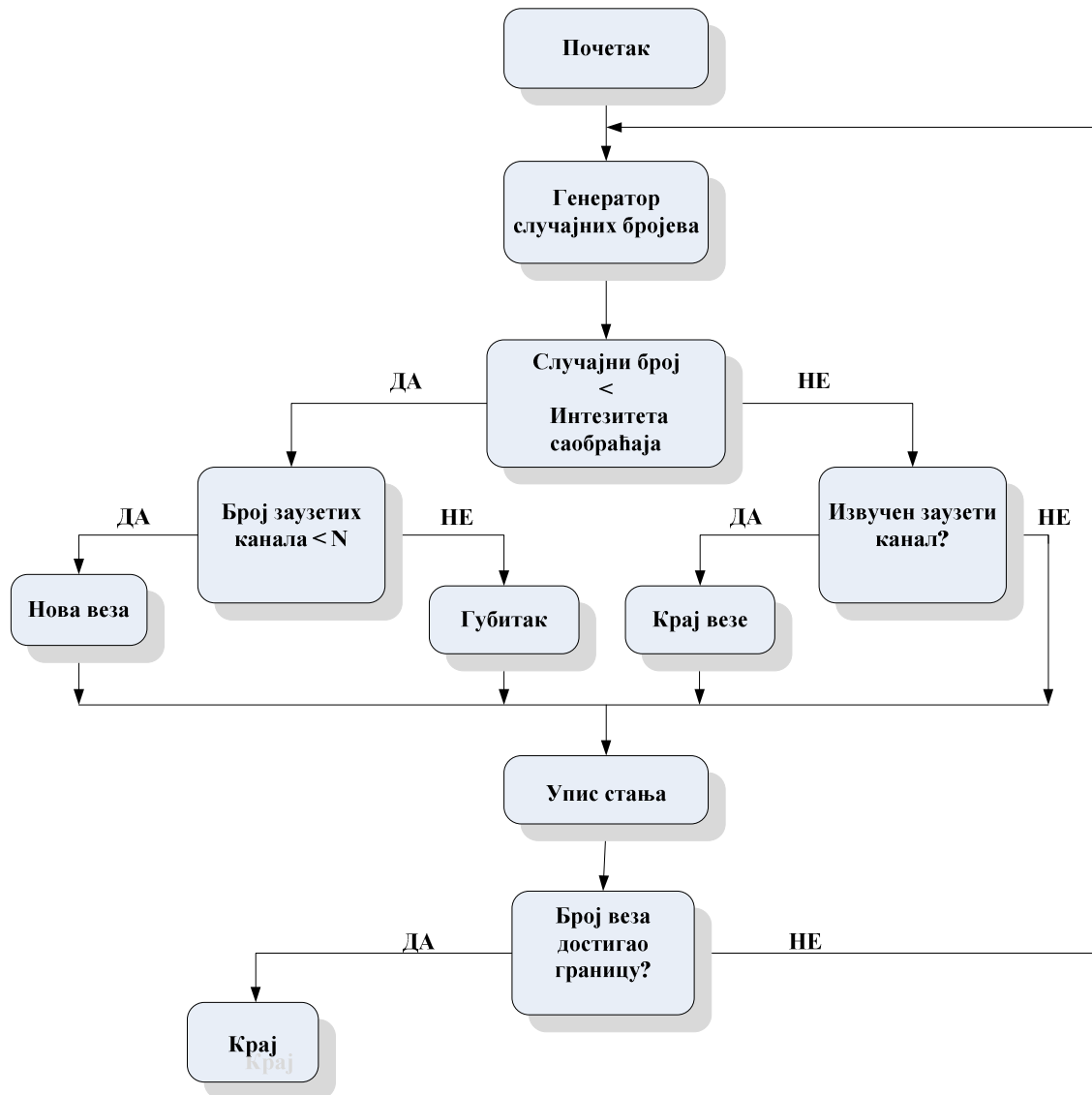
Као што се може видети из табеле, генератор случајних бројева заснован на *Mersenne Twister* алгоритму се намеће као погодан избор. Овај генератор је веома осетљив на лошу иницијализацију и може захтевати доста времена за опоравак из не-случајног иницијалног стања (стања у ком доминирају нуле). Стога се мали линеарни конгруентни генератор који много брже стартује, може искористити као *seed* за случајне иницијалне вредности *Mersenne Twister* генератора. Комбинацијом ова два генератора је задовољена велика периода понављања и добре статистичке особине у смислу случајности.

Питање симулационог софтвера је од великог значаја у овом раду. У одељку 4.8, дат је преглед најпознатијих симулатора мобилних мрежа. Комплетни симулатор за потребе ове докторске дисертације би обухватио симулацију успостављања и прекидања веза, контроле снаге, просторних расподела, моделирања услова пропагације сигнала и вођење статистике. Према томе, потребно је анализирати погодност наведених софтверских пакета за ову намену.

Симулатор GPSS/H је веома општи софтвер, који није оптимизован за неке специфичне анализе на физичком слоју (моделирање физичког сигнала). Један од недостатака је и то што је реч о комерцијалном софтверу. Симулатори SSFNet, GTNetS, NetSim и OPNET су оријентисани на горње слојеве саобраћајног модела и из тог разлога нису погодни за симулацију излазне снаге базне станице. Симулатори ns2/ns3 су софтвери оријентисани ка симулацији мреже као целине, а не само физичког аспекта мреже. Уз то је коришћење ових алата прилично сложено. OMNeT у основи и није симулатор, већ платформа за развој симулатора.

Из свега наведеног се јасно намеће закључак о потреби за специфичним симулационим софтвером који има тачно одређену намену. За потребе симулације нових, непотврђених и верификацију старих модела, у овом раду је развијен потпуно нови, оригинални симулациони софтвер. Верификација софтвера је извршена на моделима чије су карактеристике у потпуности познате. На основу потврђених резултата, усвојен је закључак о валидности датог софтвера и оправданости његове даље примени код анализе нових модела у истраживању. Сви резултати који ће бити приказани у наредним поглављима су добијени коришћењем овога софтвера.

Симулација излазне снаге базне станице почиње од симулације једног канала. Битно је поновити да се подешавање снаге базне станице врши у дискретним корацима од 2 dB. Прорачун вероватноћа заузетости канала у систему се заснива на *Erlang-B* формули. На слици 6.1 је приказан дијаграм тока за генерисање нове и прекида постојеће везе у зависности од броја слободних канала. У табели 6.2 је приказан прорачун вероватноћа стања за *Erlang*-ову групу од 16 канала добијених теоријским путем и симулацијом. Може се уочити веома добро поклапање резултата у ова два случаја.



Сл. 6.1 Дијаграм тока симулације за генерисање нове везе или прекида постојеће.

У овом раду се примењују системски услови за завршетак симулације. Као услов за излазак из симулационог процеса усвојен је број генерисаних случајних догађаја. Емпријски је утврђено да је 100 000 генерисаних случајних догађаја довољно да би се поуздано симулирали саобраћајни процеси код базних станица. Овом вредношћу је обезбеђено да се по каналу реализује бар 2 000 веза за сваку симулацију.

Обрада резултата симулације ће се вршити на такав начин да се добијени резултати који упадају у 95% интервала поверења сматрају валидним. Надаље ће



бити подразумевано да сви приказани графици зависности излазне снаге базне станице задовољавају ово правило и оно се неће експлицитно наглашавати.

Табела 6.2 Прорачун вероватноћа стања за *Erlang*-ову групу.

Вероватноће стања	Теоријски прорачун	Симулациони поступак	Релативна грешка
P[0]	0,000047	0,000044	6%
P[1]	0,000467	0,00045	3,6%
P[2]	0,002333	0,00241	3,3%
P[3]	0,007777	0,0078	0,3%
P[4]	0,019442	0,01936	0,4%
P[5]	0,038885	0,03699	4,8%
P[6]	0,064808	0,0634	2,2%
P[7]	0,092583	0,09292	0,4%
P[8]	0,115729	0,11734	1,4%
P[9]	0,128587	0,12981	0,95%
P[10]	0,128587	0,12783	0,6%
P[11]	0,116897	0,117	0,6%
P[12]	0,097415	0,09715	0,3%
P[13]	0,074934	0,074	1,25%
P[14]	0,053524	0,05374	0,5%
P[15]	0,035683	0,03672	2,9%
P[16]	0,022302	0,02287	2,5%

Из табеле се може уочити да је релативна грешка на четвртој децимали мања од 5%, што потврђује добро поклапање тероријског прорачуна и симулационог поступка.

Резултати добијени симулацијом се обрађују и врши се оцена параметара. У овој дисертацији је оцена CDF излазне снаге базне станице од велике важности. На генерисаном узорку снага се врши интеграција (сабирање) и добијају се вероватноће да излазна снага узима неку вредност која је мања или једнака од неке вредности снаге за дату класу BTS. На овај начин се врши оцена CDF.

### 6.1.1. Зависност излазне снаге једног канала од слабљења сигнала

У овом одељку приказана су поређења резултата за кумулативну функцију расподеле добијене теоријским прорачунима и симулационим поступком. Разматране су следеће вредности параметара: 16 канала, интензитет саобраћаја од 10 E, полупречник ћелије 12 km, класа снаге базне станице 4 (40 W) и фактор слабљења  $\gamma \in [2, 5]$ .

Нека се у првој апроксимацији само анализирају саобраћајни канали чија се снага динамички подешава. Ово је уведено због конзистентности с резултатима добијених аналитичким методом. Према томе, могуће је поређење резултата добијених аналитичким прорачуном и симулацијом, како би се оправдала ваљаност симулационог модела.

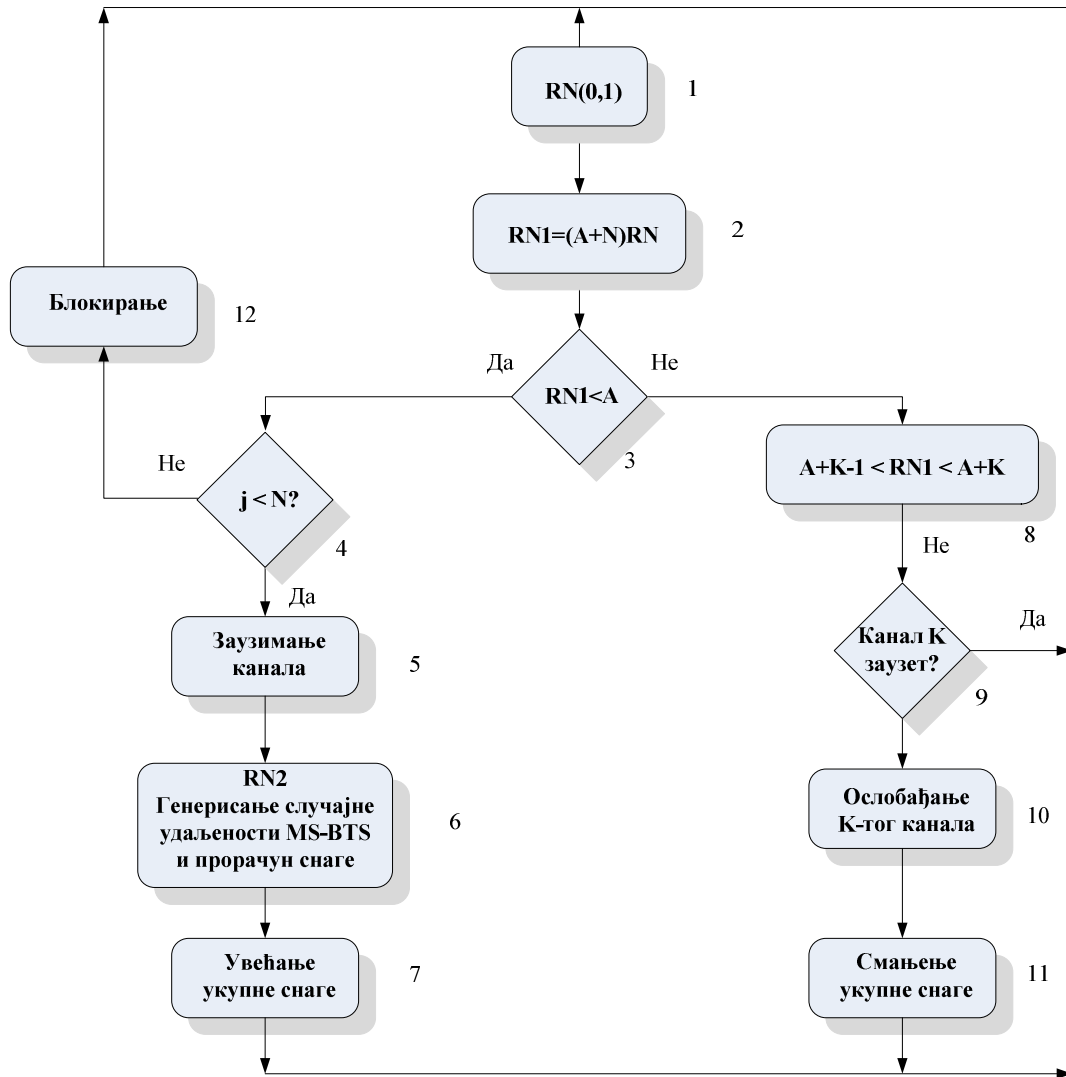
Симулациони поступак за утврђивање CDF излазне снаге базне станице је заснован на симулацији телекомуникационог саобраћаја *Monte Carlo* методом. У општем случају, статистика разговора је слична статистици преноса података, с том разликом што је трајање сесије при преносу података у начелу дуже. У оквиру овог поступка, додат је део за генерисање случајне удаљености од MS до BTS. На основу генерисане удаљености, врши се прорачун снаге. Принциписки дијаграм тока симулације за *Erlang*-ов модел је приказан на слици 6.2.

Блокови 1, 2, 3, 4, 5, 8, 9, 10 и 12 на слици 6.2. представљају делове познатог поступка *Monte Carlo* за симулацију телекомуникационог саобраћаја у *Erlang*-овом моделу. Догађаји у саобраћају (нова веза, прекид постојеће везе) се симулирају на основу генерисаног случајног броја помоћу генератора случајних бројева RNG1. Блокови 6, 7 и 11 представљају надоградњу поступка за симулациону процену излазне снаге. Блок 6 одређује случајну удаљеност MS - BTS и снагу канала за нову везу. Ова случајност се одређује на основу генерисаног случајног броја помоћу другог генератора случајних бројева RNG2. Овај генератор такође генерише случајне бројеве у интервалу (0,1) према униформној расподели. У циљу одређивања удаљености корисника, сагласно изворима [58] и [59], примењује се израчунавање инверзном функцијом на основу површинске вероватноће

$$x = RN2 = \pi d^2 / \pi R^2 \Rightarrow$$

$$d = R \cdot \sqrt{RN2} \quad (6.1)$$

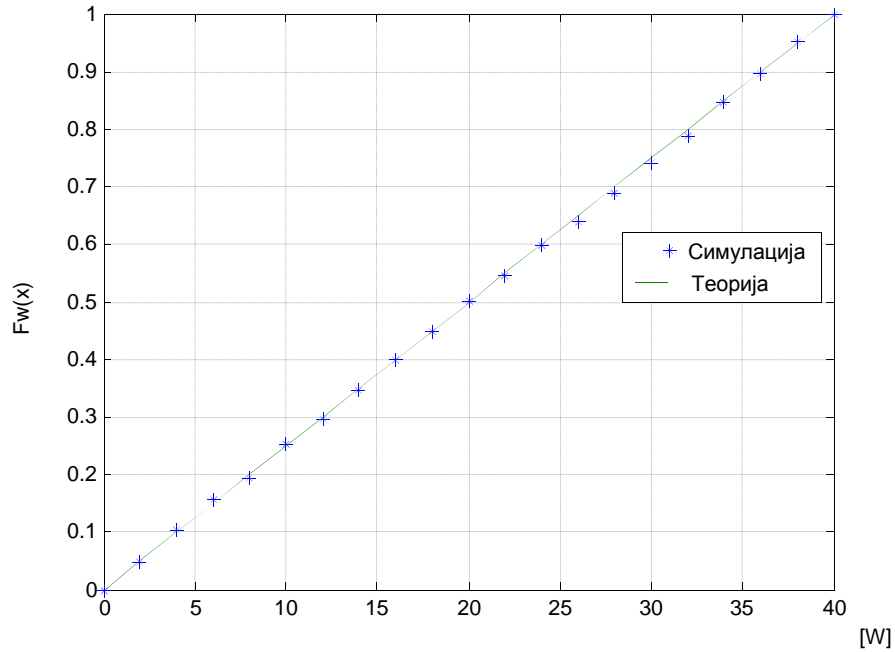
Блок 7 евидентира увећање укупне снаге BTS за вредност снаге нове везе. Блок 11 умањује укупну снагу BTS сагласно снази канала на којем се завршава веза.



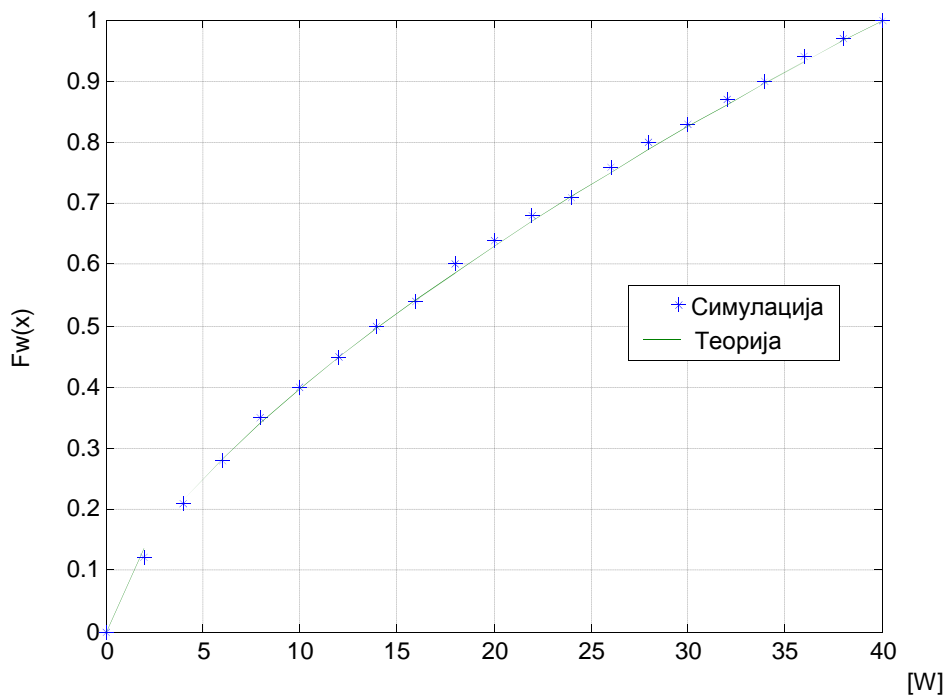
Сл. 6.2 Принциписки дијаграм тока симулације (*Erlang*-ова група).

На сликама 6.3-6.6 су приказани резултати за теоријски и симулирани случај. На слици 6.7 је приказана зависност средње снаге једног канала у функцији слабљења, за случајеве теоријског прорачуна и симулације. Са слика се може уочити да постоји добро поклапање резултата добијених аналитички путем и симулационим поступком. За вредности фактора слабљења 2, 3, 4 и 5, добија се да је 90%-тна вредност CDF снаге једног канала 36W, 33W, 32W и 31W,

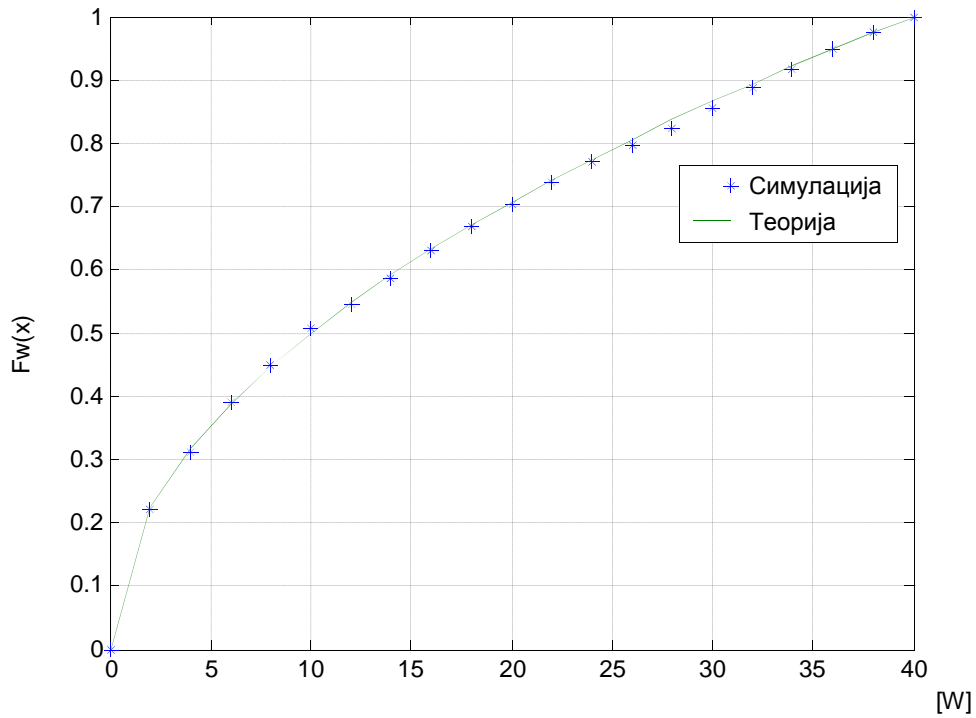
респективно. Потврђује се интуитивно јасан закључак да је излазна снага једног канала већа у случају мање вредности фактора слабљења.



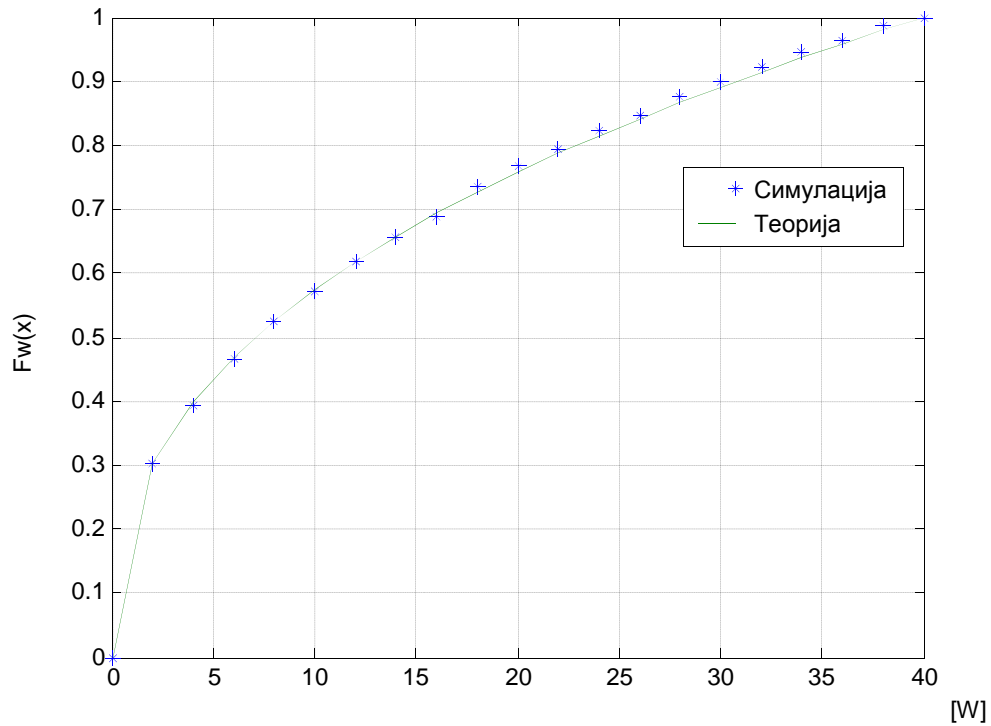
Сл. 6.3 CDF снаге једног канала за случај симулације и теоријског прорачуна ( $N = 16, A = 10E, w_{max} = 40 W, R = 12 km, \gamma = 2$ ).



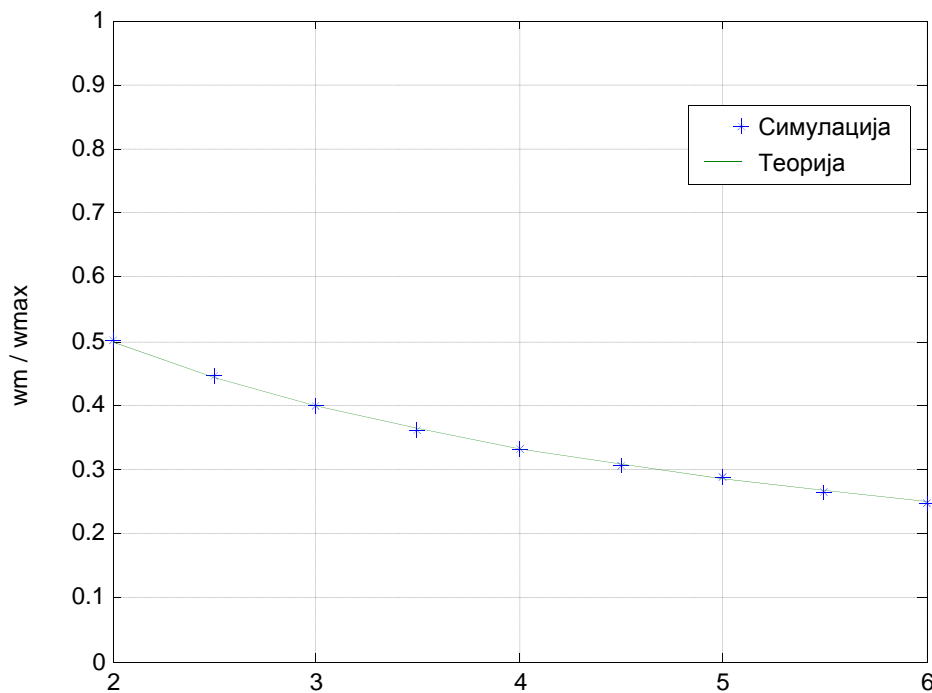
Сл. 6.4 CDF снаге једног канала за случај симулације и теоријског прорачуна ( $N = 16, A = 10E, w_{max} = 40 W, R = 12 km, \gamma = 3$ ).



Сл. 6.5 CDF снаге једног канала за случај симулације и теоријског прорачуна ( $N = 16, A = 10E, w_{max} = 40 W, R = 12 km, \gamma = 4$ ).



Сл. 6.6 CDF снаге једног канала за случај симулације и теоријског прорачуна ( $N = 16, A = 10E, w_{max} = 40 W, R = 12 km, \gamma = 5$ ).



Сл. 6.7 Однос средње снаге једног канала и максималне снаге у зависности од  $\gamma$ .

Јасно се може уочити добро поклапање резултата добијених аналитички и симулацијом. Са графика се види да је за случај линеарне зависности слабљења сигнала снага једног канала једнака половни максималне снаге. Утицај фактора слабљења који није константан (зависи од удаљености), има више смисла разматрати у симулацији укупне снаге базне станице.

## 6.2 Симулација модела групе канала

Када се разматра укупна излазна снага базне станице, разматрају се тренутна, средња и максимална снага, густина расподеле и кумулативна функција расподеле (CDF). Прорачун CDF-а укупне излазне снаге је веома сложен, јер укључује прорачун снаге за сваки канал, као и утицај саобраћаја. Симулациони модели који укључују утицаје различитих назависних случајних величина су, у општем случају, веома сложени.

Код симулације групе канала односно базне станице, треба урачунати утицај ВССН носилаца и сигнализације на укупну расподелу снаге базне станице.

Овај део снаге има константну вредност, и у симулацији се понаша као адитивна константа. Усвојен је реалистичан профил саобраћаја, где на говор отпада 70%, а на податке 30% укупног саобраћаја [82]. Дат је приказ расподеле снаге за случај када се примењује DTX, и када се не примењује. Стога се јасно може уочити добитак, односно смањење потрошње, користећи технику емитовања с прекидима. Разматрају се базне станице са 3 и 5 носилаца. У случају да постоје 3 носиоца по базној станици (ВССН и 2 ТСН носиоца), ефективно се користи 16 канала с динамичком контролом снаге, а 5 канала су са константном, максималном снагом [83]. Код базних станица са 5 носилаца (ВССН и 4 ТСН носилаца), 32 саобраћајна канала су са динамичком контролом снаге, а 5 су са константном, максималном снагом. Усвојена је приоритетизација ВССН носилаца, односно прво се заузимају саобраћајни канали на ВССН носиоцу, а потом на осталим носиоцима. Тиме се ефективно штеди енергија, пошто је ВССН носилац емитован увек с максималном снагом. Такође, све претпоставке из претходног поглавља су важеће у даљем симулационом поступку. Емисиона снага базне станице припада опсегу  $[w_{min}, w_{max}]$ , где је са  $w_{min}$  означена минимална емисиона снага базне станице према блиским мобилним станицама. Пошто се у симулацији посматра класа 4, минимална снага базне станице је за овај случај 40 mW. Као што је већ напоменуто, максимална снага базне станице је одређена максималном снагом за дату класу.

Нека се разматра група од  $N$  саобраћајних канала у једној ћелији, на којима се примењује динамичка контрола снаге. За сваку везу која се остварује, потребан је један канал. Број мобилних станица,  $N_{ms}$ , много је већи од  $N$ , стога се саобраћајни процес у групи саобраћајних канала може описати *Erlang*-овим моделом с губицима, [55].

Густина расподеле случајне величине  $S_n$  која је добијена сумом  $n$  независних случајних величина које имају исту густину расподеле,  $S_n = x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n$ , означаваће се као  $f_{S_n}(x)$  и она представља  $n$ -тоструку конволуцију густина расподеле, [49]:

$$f_{S_n}(x) = f_{x_1}(x) * f_{x_2}(x) * f_{x_3}(x) * \dots * f_{x_n}(x). \quad (6.2)$$

Укупна снага базе станице представља збир снага свих активних канала. На укупну снагу базе станице, поред удаљености појединих MS од BTS и слабљења сигнала при преносу, утиче и саобраћај. Укупна излазна снага,  $w_B$ , је у случају заузетости  $k$  канала, ( $k=1,2,3,\dots,N$ ) као случајна величина једнака збиру случајних величина снага свих активних канала,

$$w_{Bk} = \sum_{i=1}^k w_i . \quad (6.3)$$

Према томе, густина вероватноће расподеле величине  $w_B$ , када је  $k$  канала заузето,  $f_{w_{Bk}}(x)$ , може се добити из  $k$ -тоструке конволуције

$$f_{w_{Bk}}(x) = f_{w_1}(x) * f_{w_2}(x) * f_{w_3}(x) * \dots * f_{w_k}(x), \quad (6.4)$$

где је  $f_{w_i}(x)$  густина расподеле излазне снаге  $i$ -тог заузетог саобраћајног канала,  $i = 1,2,3,\dots,k$ .

CDF излазне снаге базе станице, ако је заузето  $k$  канала је  $F_{w_{Bk}}(x)$

$$F_{w_{Bk}}(x) = \int_0^x f_{w_{Bk}}(w)dw . \quad (6.5)$$

CDF укупне излазне снаге базе станице која има  $N$  саобраћајних канала,  $F_{w_B}(N,x)$ , означава вероватноћу да је укупна излазна снага мања или једнака  $x$ :

$$F_{w_B}(N, x) = P\{w_B \leq x\}. \quad (6.6)$$

Ова вероватноћа се може изразити као

$$P\{w_B \leq x\} = \begin{cases} P\{w_B = x\} = ERL(0, A, N) & \text{за } x = 0 \\ P\{w_B \leq x\} & \text{за } x > 0 \end{cases} . \quad (6.7)$$

CDF укупне излазне снаге базе станице која има  $N$  саобраћајних канала,  $F_{w_B}(N,x)$ , сада је

$$F_{w_B}(N, x) = ERL(0, A, N) + P(1, A, N) \cdot F_{w_{B1}}(x) + P(2, A, N) \cdot F_{w_{B2}}(x) + \dots + P(N, A, N) \cdot F_{w_{BN}}(x) , \quad (6.8)$$

или

$$F_{w_B}(N, x) = ERL(0, A, N) + \sum_{i=1}^N ERL(i, A, N) \cdot F_{w_{Bi}}(x) . \quad (6.9)$$



Познато је да је израчунавање конволуције често сложено [55], те је стога и одређивање CDF излазне снаге базне станице сложен проблем. Овде долази до изражаја погодност симулационог поступка код одређивања CDF-а излазне снаге базне станице. Симулациони поступак мора бити веродостојан, тј. мора да буде проверен за случајеве када се CDF може одредити и рачунским путем

Нека се посматра група од  $N=5$  саобраћајних канала у једној GSM ћелији чији је полупречник  $R=30$  km. Ћелија користи FDM-TDM технологију и свака учестаност садржи 8 канала. Нека се претпостави у првој апроксимацији да је зависност снаге канала од удаљености квадратна ( $\gamma=2$ ). GSM базна станица ради у класи 4, тј.  $w_{max} = 40$  W у току трајања временског слота. Сваки канал доприноси укупној снази износом  $\omega=w/8$ . Из једначине (5.8) претходног поглавља, види се да је  $f_w(x)=(1/aR^2)$  тј. снага једног канала  $w$  (односно  $\omega$ ) има равномерну расподелу у интервалу  $0 < w < w_{max}$  ( $0 < \omega < \omega_{max} = 5$  W).

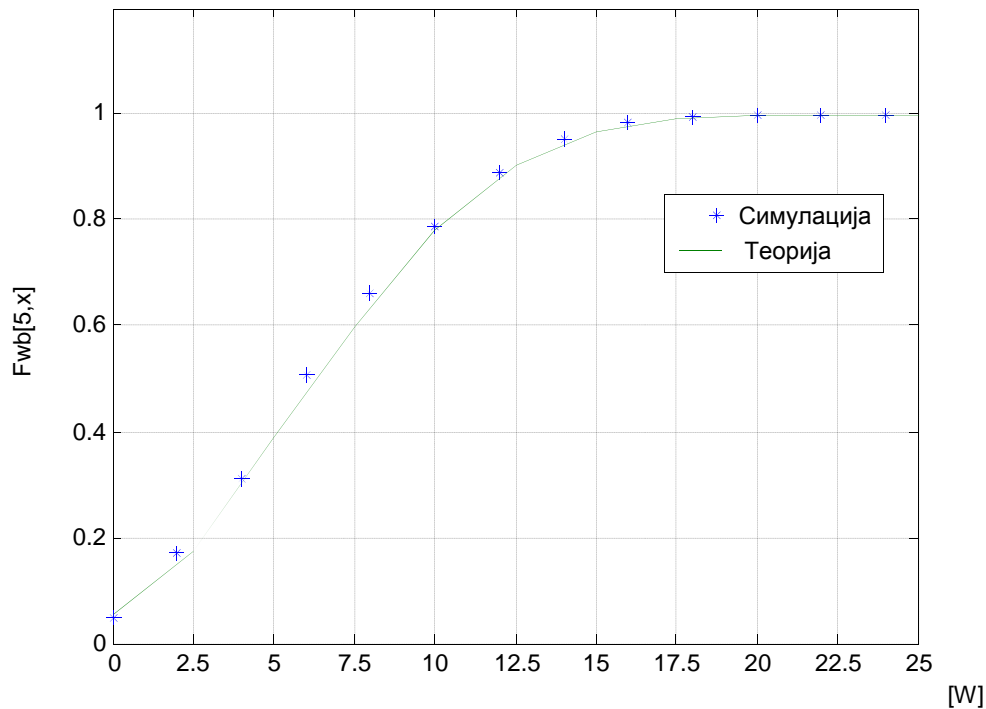
У овом случају је укупна излазна снага BTS једнака збиру снага свих активних канала у којима је снага равномерно расподељена. За случајну величину  $x$  која је збир  $n$  равномерно расподељених случајних величина у интервалу  $(0,1)$  важи *Irwin-Hall*-ова расподела, [84, 85], чија је густина вероватноће:

$$f_x(x, n) = \frac{1}{2(n-1)!} \sum_{k=1}^x (-1)^k \binom{n}{k} (x-k)^{n-1} \operatorname{sgn}(x-k), \quad (6.10)$$

где је

$$\operatorname{sgn}(x-k) = \begin{cases} -1, & x < k \\ 0, & x = k \\ 1, & x > k \end{cases} \quad (6.11)$$

Једначина (6.10) се може искористити за израчунавање густине расподеле из једначине (6.8), а потом и CDF-а из једначине (6.9). На слици 6.8 је приказано поређење CDF-а излазне снаге базне станице за теоријски случај и симулацију [86].



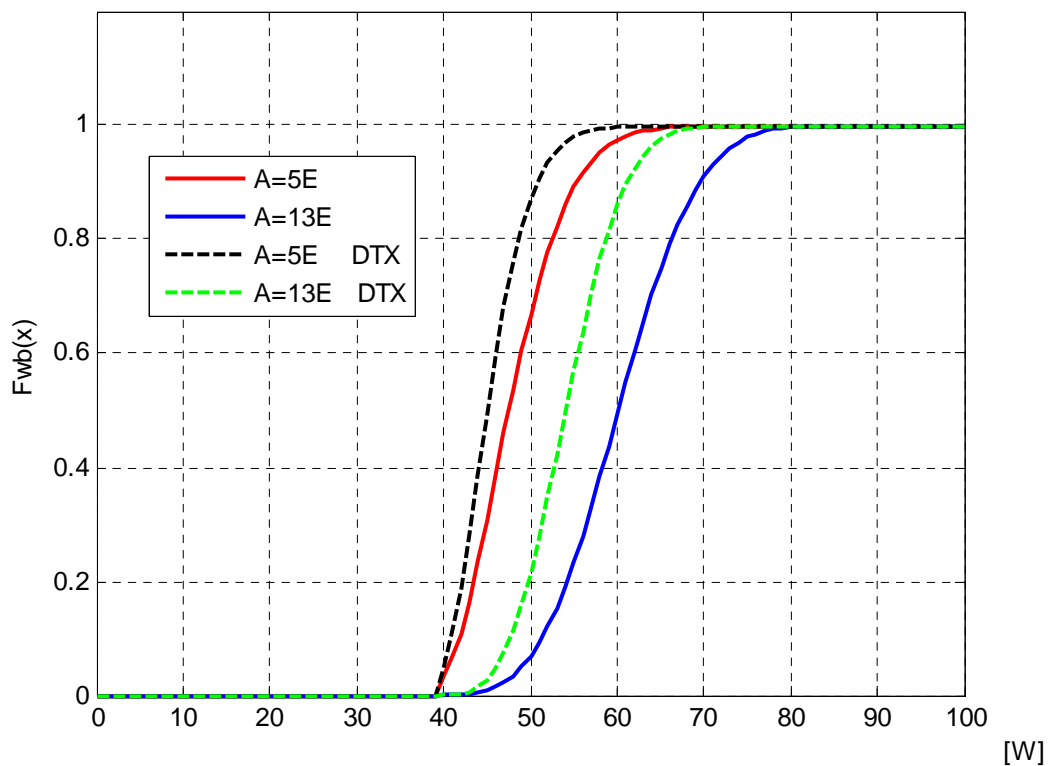
Сл. 6.8 CDF излазне снаге базе станице за теоријски случај и симулацију.

На основу претходне анализе, могуће је извести одређене закључке везане за поузданост и тачност симулационог поступка у општем случају. Резултати симулације у високом степену слагања потврђују резултате прорачуна за посматрани једноставни случај квадратне зависности слабљења сигнала од удаљености. И остали услови у посматраном примеру су једноставни: расподела мобилних корисника у ћелији је равномерна, свака веза захтева само један канал а примењује се најједноставнији *Erlang*-ов саобраћајни модел. Може се закључити да се за прецизну процену функције расподеле излазне снаге базе станице у GSM мрежи може избећи сложено рачунање и употребити симулациони поступак који је лак за примену а довољно прецизан. Ово представља једну од кључних предности симулационог поступка у анализи сложених проблема који могу карактерисати мобилне мреже.

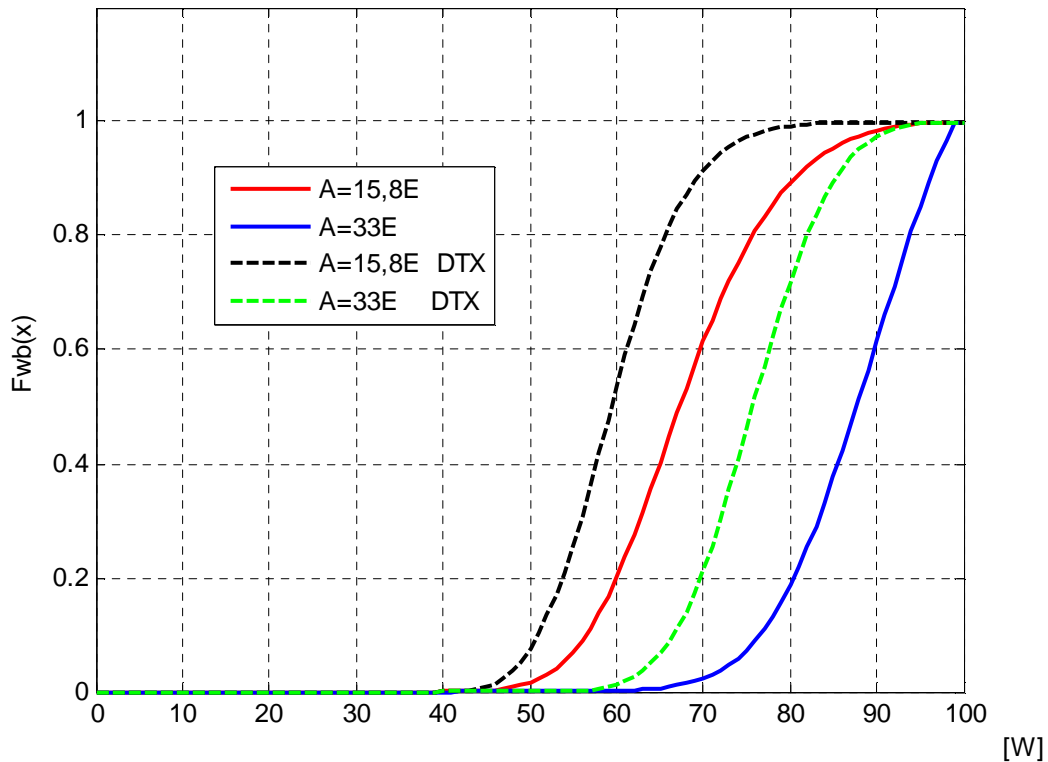
На наредним нумеричким примерима је приказан утицај интензитета саобраћаја на излазну снагу базе станице у *Erlang*-овом моделу [76]. Симулационо модел је приказан на слици 6.2. Сва даља анализа симулационих

модела ће урачунавати утицај снаге ВССН носилаца и сигнализације на укупну расподелу излазне снаге базне станице. Такође се анализирају режими рада када је примењен и када није примењен DTX метод, тако да се јасно може уочити допринос овог метода у уштеди енергије, тј. смањењу потрошње базне станице.

Нека се усвоје следећи параметри система:  $N = 16$ ,  $w_{max} = 40W$ ,  $R = 10$  km,  $\gamma = 3,5$ . Такође, посматра се случај где је удео говорног саобраћаја 70%, а података 30%. На сликама 6.9 и 6.10 су приказане зависности CDF снаге базне станице од интензитета саобраћаја. На сваком од графика је дата расподела снага у случају када се примењује DTX метод и када се не примењује DTX метод. Услед коришћења DTX метода, CDF излазне снаге се помера у лево, односно ка мањим вредностима снаге. Може се извести општи закључак о утицају емитовања са прекидима на смањење излазне снаге базне станице, те се примењује на све даље резултате без експлицитног наглашавања. Могуће је јасно уочити предност овакве врсте емитовања са становишта енергетске ефикасности односно уштеде енергије.



Сл. 6.9 CDF излазне снаге базне станице (*Erlang*-модел)  
( $N = 16$ ,  $w_{max} = 40$  W,  $R = 10$  km,  $\gamma = 3,5$ ).



Сл. 6.10 CDF излазне снаге базе станице (*Erlang*-ов модел)  
 $(N = 32, w_{max} = 40 W, R = 10 km, \gamma = 3,5)$ .

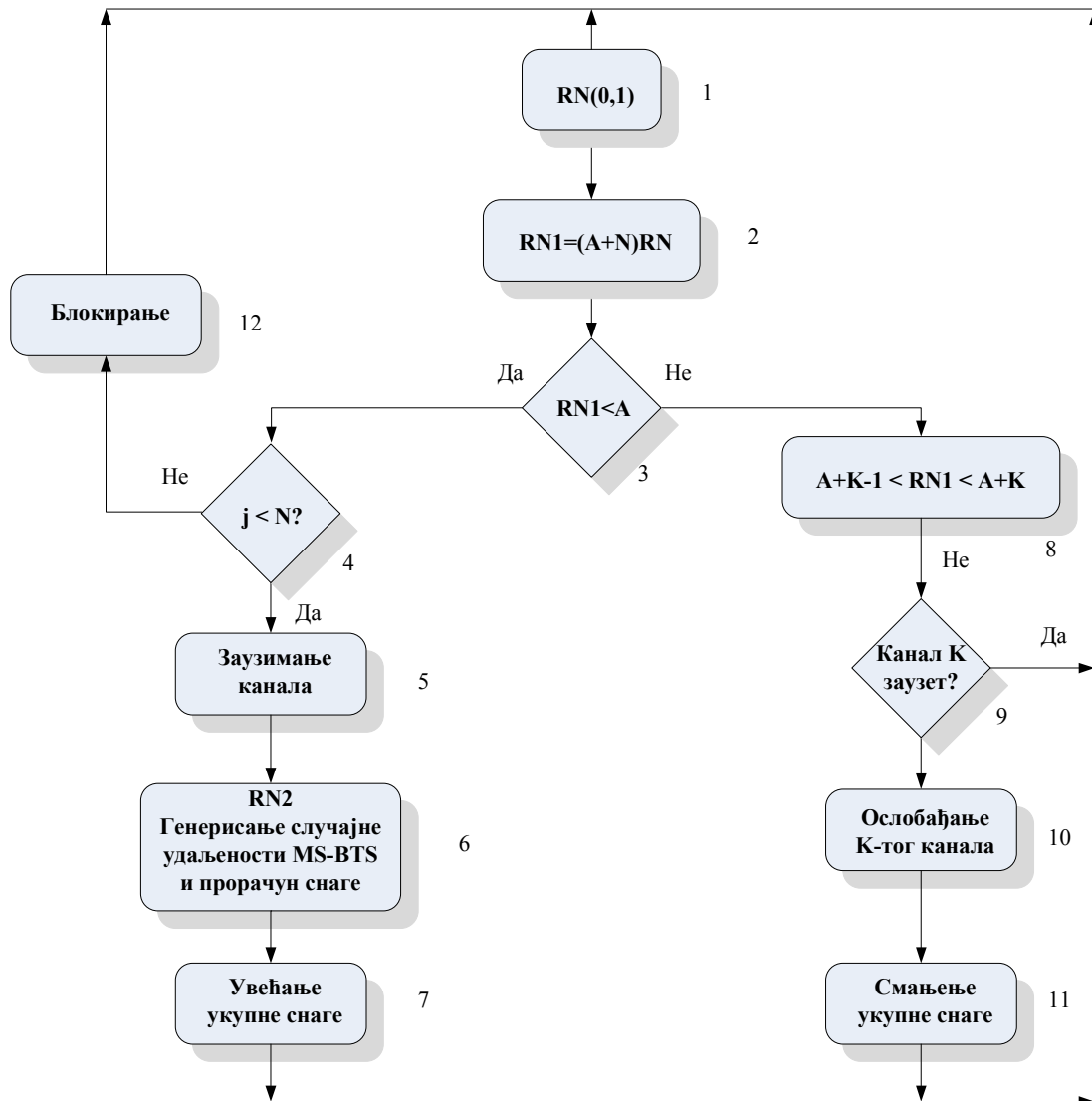
Због чињенице да је снага на ВССН носиоцу увек максимална, CDF излазне снаге базе станице је померен удесно. У даљим анализама, CDF се неће приказивати од нуле на апциси, већ ће бити директно урачунат померај услед ВССН носиоца.

### 6.2.1. Зависност излазне снаге од густине корисника

Расподела корисника је значајан параметар у ћелијским мрежама. Ради једноставније анализе, уобичајено је да се полази од униформне расподеле корисника у ћелији. Као што је напоменуто у претходном поглављу, корисници су у општем случају неуниформно расподељени. Анализа аналитичким путем је могућа у случају неки једноставних расподела корисника. За сложене случајеве где не постоји решење у затвореном облику, неопходно је приступити симулационом поступку. У овом одељку се разматра утицај неуниформне густине корисника на излазну снагу базе станице симулационим поступком. Приказани

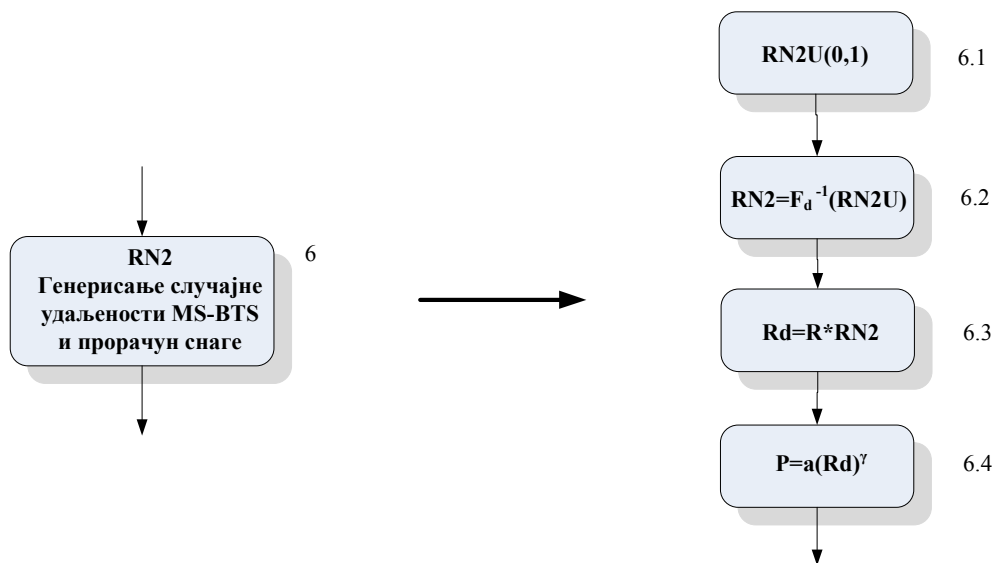
су резултати симулације за различите густине корисника анализирани у одељку 5.1.3. Упоредљиви су резултати за различите вредности интензитета саобраћаја.

На слици 6.11 је приказан дијаграм тока за одређивање излазне снаге базе станице у случају неуниформне густине корисника у ћелији. Дијаграм тока је веома сличан моделу са униформном густином корисника у ћелији. Разлика се огледа у начину генерисања случајне удаљености између мобилне и базе станице. Блокови 1, 2, 3, 4, 5, 8, 9, 10 и 12 на слици 6.11 симулирају саобраћајни ток у *Erlang*-овом моделу. Блокови 6, 7 и 11 представљају поступак за симулациону процену излазне снаге.



Сл. 6.11 Дијаграм тока симулационог поступка за неуниформну густину корисника у ћелији.

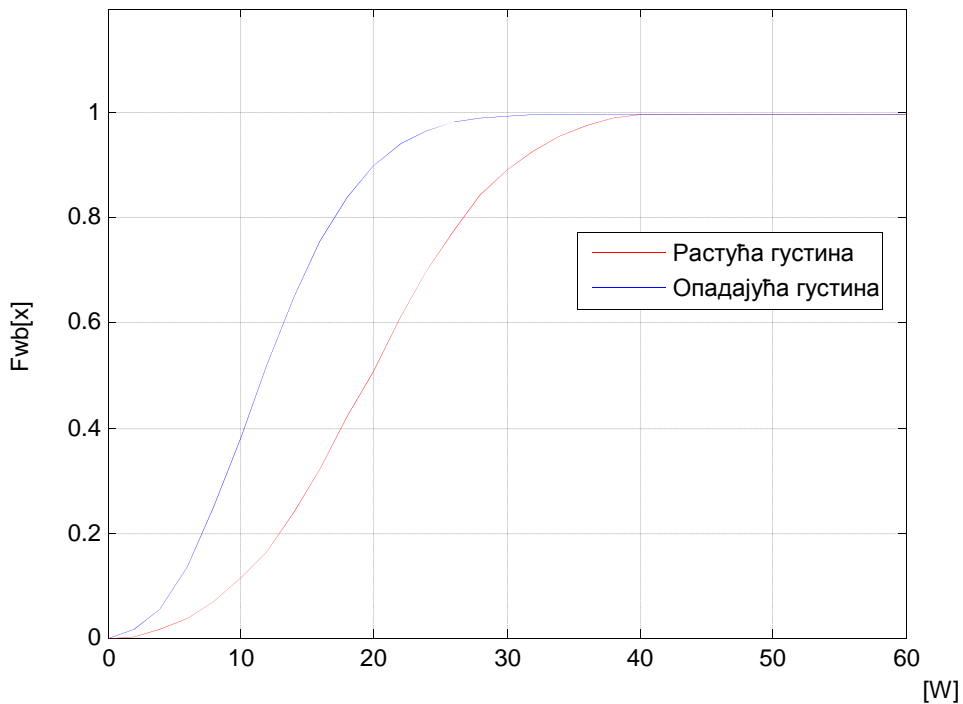
Разлика између модела са униформном и неуниформном густином корисника се огледа у начину генерисања случајне удаљености између мобилне и базне станице, односно прорачуна излазне снаге базне станице. Стога се блок за генерисање удаљености и прорачун излазне снаге (блок 6) може разложити на четири логичке целине, што је приказано на слици 6.12. Први блок, означен са 6.1, генерише случајне бројеве са униформном расподелом у опсегу (0,1). У другом кораку се одређује инверзна функција CDF растојања за дати случајни број из првог корака. Трећи блок, означен са 6.3, одређује случајну удаљеност неке везе  $R_d$ , множењем полупречника ћелије случајним бројем RN2. Четврти блок, означен са 6.4, одређује случајну излазну снагу неке везе. Битно је напоменути да су сви генератори случајних бројева који се јављају у дијаграму тока симулације (генерисање догађаја у саобраћајном процесу, одређивање случајне удаљености између мобилне и базне станице) у потпуности међусобно независни.



Сл. 6.12 Блок за генерисање удаљености MS-BTS и одређивање снаге.

У одељку 5.2.3. анализирани су опадајућа, растућа и експоненцијална густина корисника у ћелији. Том приликом су изведени аналитички изрази за CDF излазне снаге једног канала и средњу снагу једног канала. Потом, да би се резултати анализе уопштили, расподела корисника је моделирана бета расподелом. Такође су прорачунати CDF излазне снаге једног канала и средња снага једног канала за различите вредности параметара бета расподеле. На слици

6.13 су приказани резултати симулације излазне снаге базне станице за линеарно опадајућу и растућу густином корисника у ћелији. Симулација за ове случајеве се заснива на генерисању случајних растојања на основу инверзне функције добијене апроксимацијом полиномском функцијом. Усвојени су следећи параметри:  $N = 14$ ,  $w_{max} = 40$  W,  $R = 20$  km, и  $\gamma = 3$ .

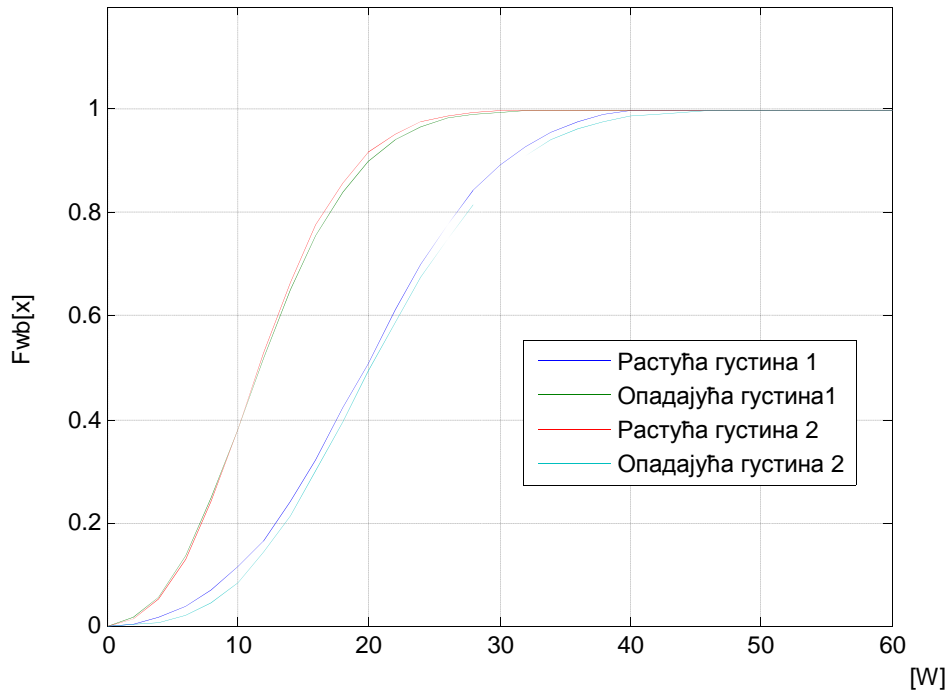


Сл. 6.13 CDF излазне снаге базне станице за опадајућу (плава линија) и растућу гуштину корисника (црвена линија).

Са графика се може уочити да је у случају растуће густине корисника излазна снага већа. То се објашњава чињеницом да је потребна већа излазна снага за кориснике који су удаљенији од базне станице.

У општем случају, налажење инверзне функције је сложен задатак. Разлог лежи у томе што за неке функције не постоји аналитички израз инверзне функције или је, пак, веома тешко добити решење у затвореној форми. Стога се тај проблем мора решавати нумерички, односно симулацијом. У поглављу 5, тај је проблем решаван апроксимацијом инверзне функције одговарајућим полиномима. Други приступ се огледа у коришћењу трансформационог емпиријског метода [59]. Овај метод може да се користи за функције произвољних расподела, када није могуће добити инверзну функцију у затвореном аналитичком облику. На слици 6.14 је

дато поређење резултата симулације CDF излазне снаге базне станице за опадајућу и растућу густину корисника, када се инверзна функција CDF растојања добија апроксимацијом или трансформационим емпиријским методом.



Сл. 6.14 Поређење CDF-а излазне снаге базне станице за опадајућу и растућу густину добијених апроксимацијом (означене са 1) и трансформационим емпиријским методом (означене са 2).

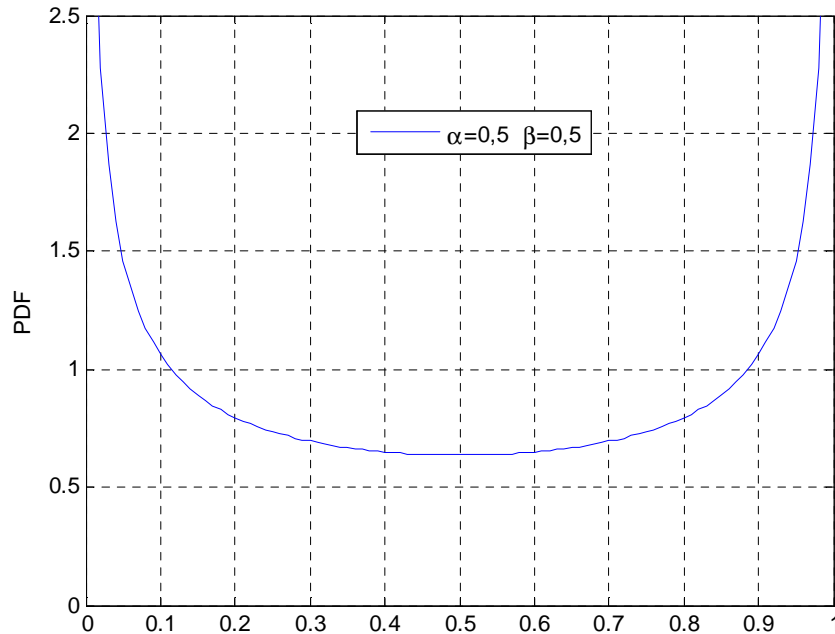
Са слике 6.14 се види добро поклапање резултата добијених апроксимативним и трансформационо емпиријским методом. Релативна грешка ових метода се крећу у опсегу од 1-4%. Надаље се примењује трансформациони емпиријски модел, пошто је погодан за имплементацију на рачунару.

У даљем излагању су представљени резултати симулација излазне снаге базне станице за случајеве када се густина корисника моделира бета расподелом. У зависности од параметара  $\alpha$  и  $\beta$ , представљени су модели који одговарају урбаном, руралном и комбиновано урбано-руралном окружењу. За  $\alpha = 1$ ,  $\beta = 1$ , бета расподела се своди на униформну расподелу корисника.

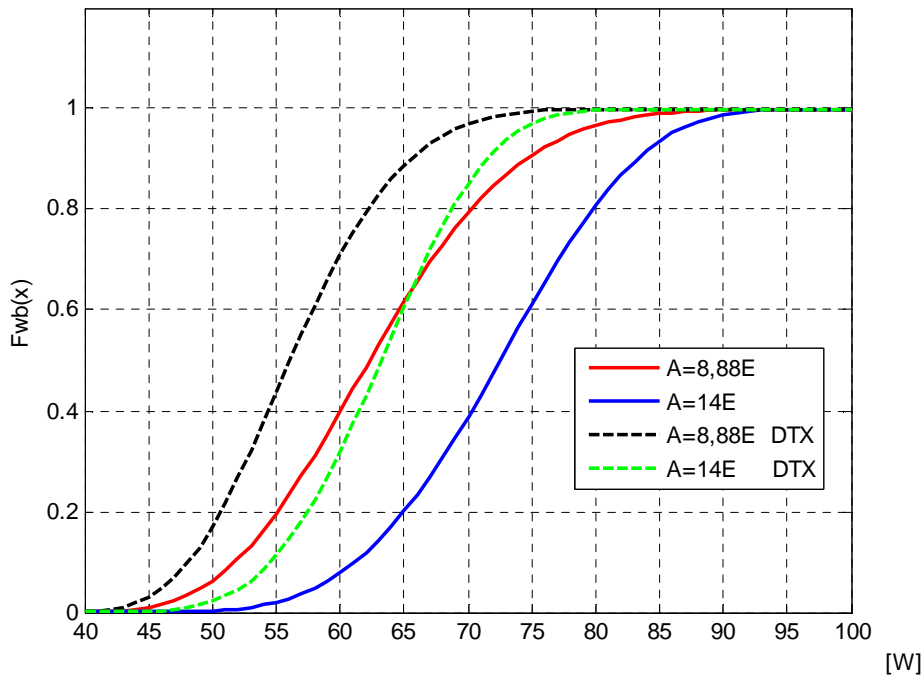
Први случај који се анализира представља комбиновани урбано-рурални модел, с параметрима  $\alpha = 0,5$ ,  $\beta = 0,5$ . Густина корисника је највећа у центру



ћелије (базна станица) и монотono опада од центра, а потом расте идући ка ивици ћелије. Функција густине бета функције за овај случај је приказана на слици 6.15. На слици 6.16 је приказана CDF излазне снаге базне станице добијене симулационим поступком.



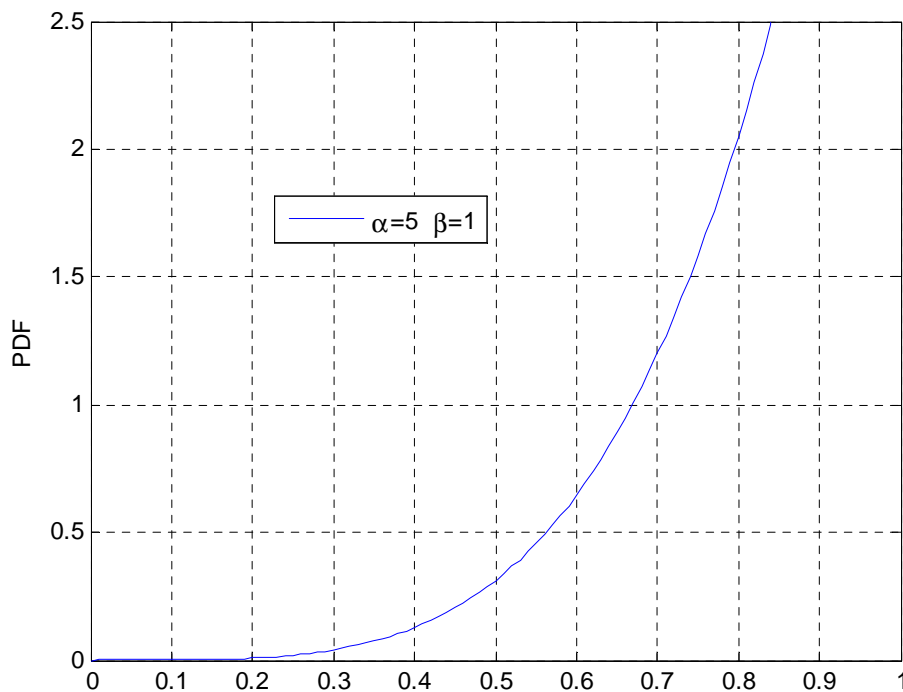
Сл. 6.15 Функција густине вероватноће бета функције за  $\alpha = 0,5$ ,  $\beta = 0,5$ .



Сл. 6.16 Поређење CDF излазне снаге базне станице у зависности од саобраћаја за случај густине са слике 6.15. ( $N = 16$ ,  $w_{max} = 40$  W,  $R = 10$  km,  $\gamma = 3,5$ ).

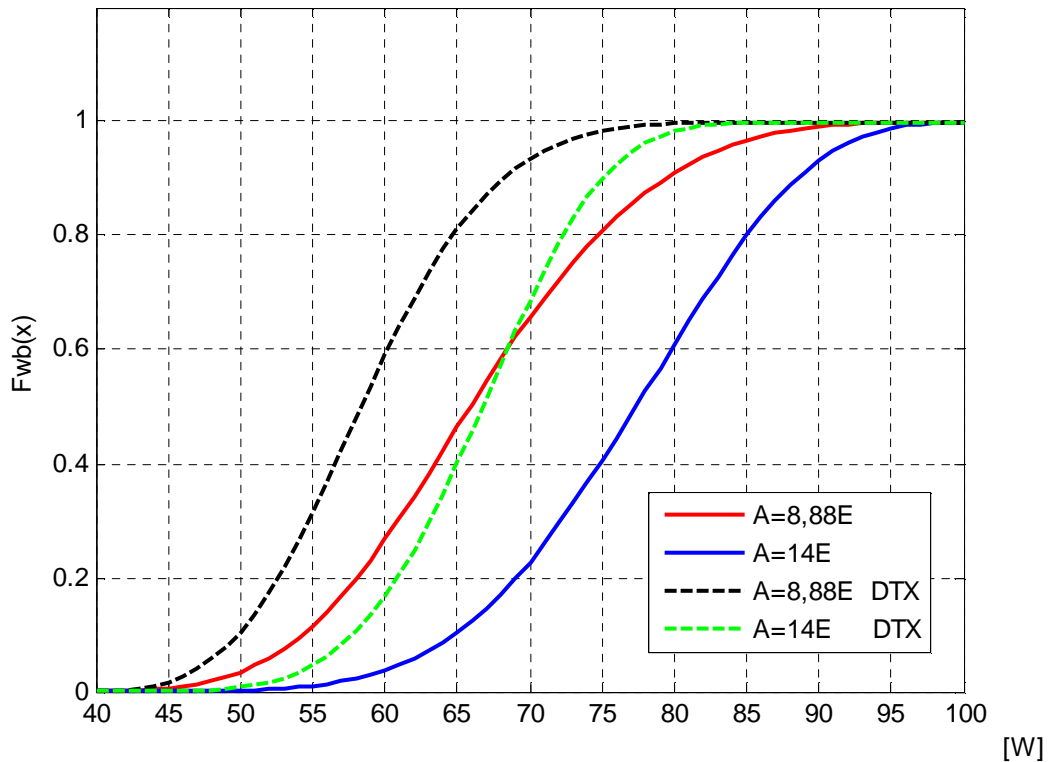
Због чињенице да је густина корисника највећа у непосредној близини базе станице и на ободу ћелије, CDF излазне снаге базе станице расподељена је у опсегу средњих вредности снаге. Наиме, 90%-тна вредност CDF дате вредности саобраћаја у случају када се не примењује DTX се налази у опсегу 75-83% максималне снаге, што је разлика за око 8%. У случају када се DTX примењује, 90%-тна вредност CDF је у опсегу 65-72% , односно око 7% разлике. Применом DTX смањује се израчена снага за око 13%.

Други случај који се анализира представља рурални модел, с параметрима  $\alpha = 5$  ,  $\beta = 1$ . Густина корисника расте идући ка ивици ћелије. Функција густине бета функције за овај случај је приказана на слици 6.17.



Сл. 6.17 Функција густине вероватноће бета функције за  $\alpha = 5$  ,  $\beta = 1$ .

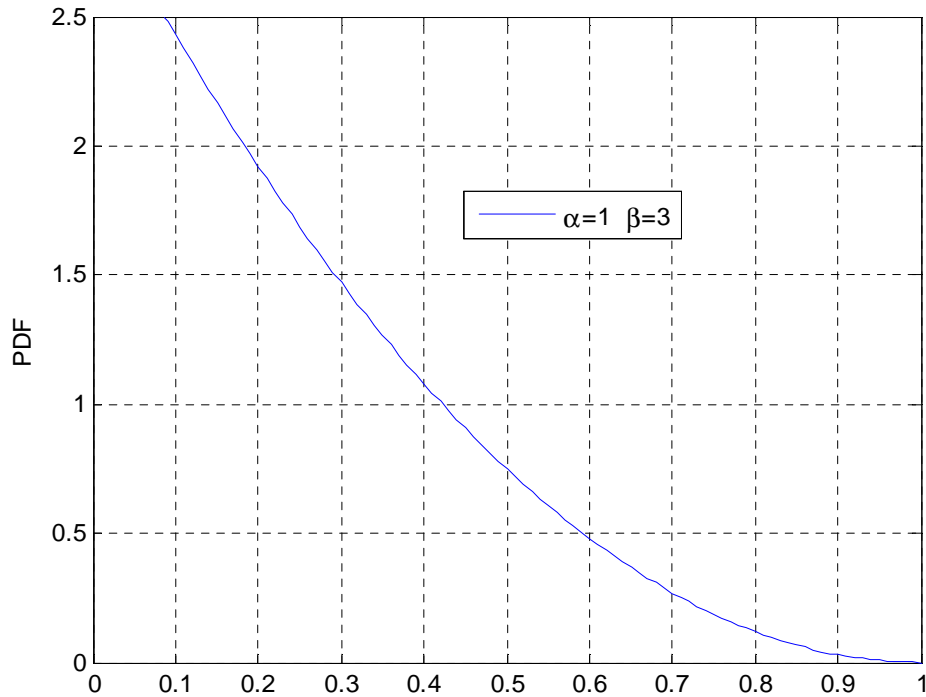
На слици 6.18 је приказана CDF излазне снаге базе станице добијена симулационим поступком.



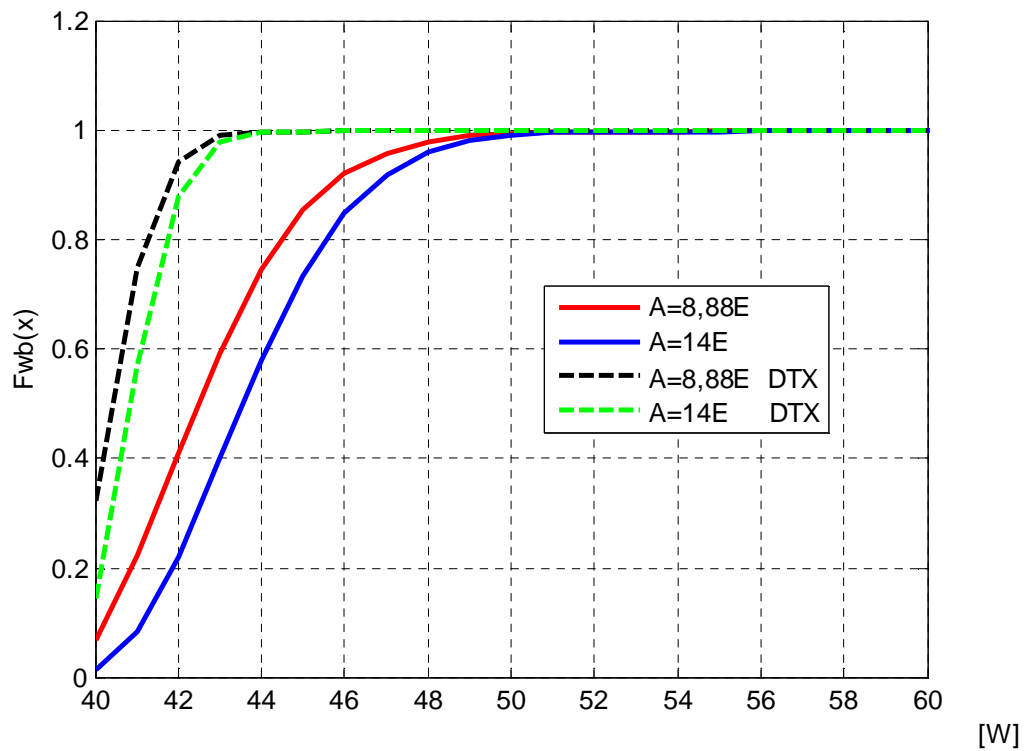
Сл. 6.18 Поређење CDF излазне снаге базе станице у зависности од саобраћаја за случај густине са слике 6.17. ( $N = 16, w_{max} = 40 \text{ W}, R = 10 \text{ km}, \gamma = 3,5$ ).

Овај случај представља типичну експоненцијалну растућу густину, те се закључује да је CDF излазне снаге базе станице расподељена на већим вредностима снага. Наиме, 90%-тна вредност CDF дате вредности саобраћаја без примене DTX је у опсегу 80-89% максималне снаге. У случају када се DTX примењује, 90%-тна вредност CDF је у опсегу 67-75%. Може се извести закључак да је излазна снага смањена за око 15% применом DTX метода.

Трећи случај представља рурални модел, с параметрима  $\alpha = 1, \beta = 3$ . Густина корисника опада од центра ка ивици ћелије. Функција густине бета функције за овај случај је приказана на слици 6.19. На слици 6.20 је приказана CDF излазне снаге базе станице добијена симулационим поступком.



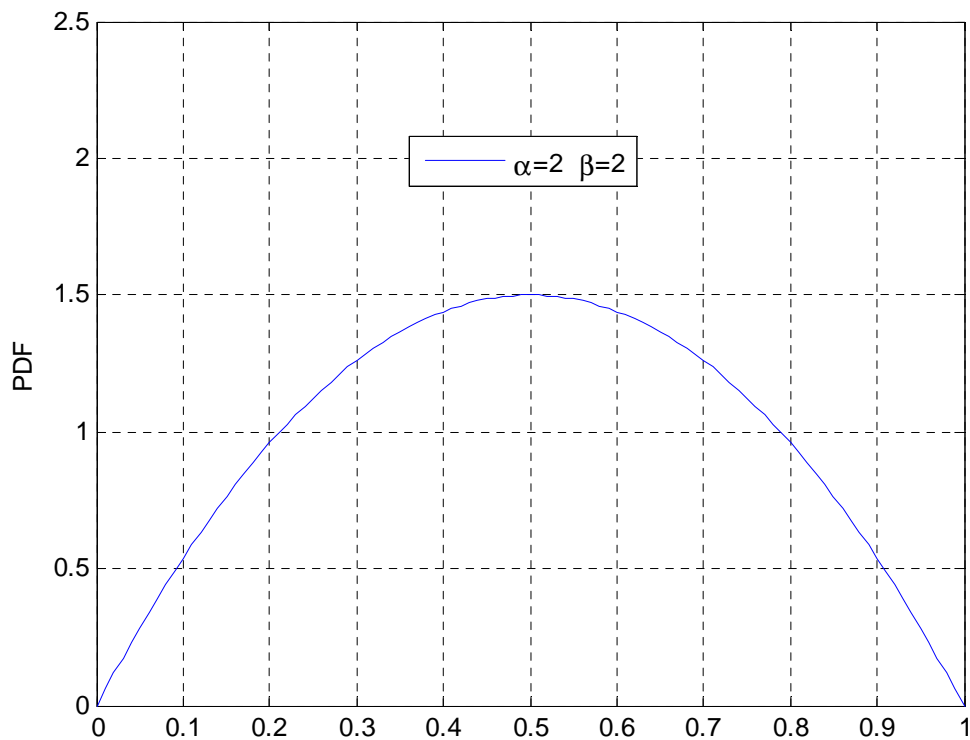
Сл. 6.19 Функција густине вероватноће бета функције за  $\alpha = 1$ ,  $\beta = 3$ .



Сл. 6.20 Поређење CDF излазне снаге базе станице у зависности од саобраћаја за случај густине са слике 6.19. ( $N = 16$ ,  $w_{max} = 40$  W,  $R = 10$  km,  $\gamma = 3,5$ ).

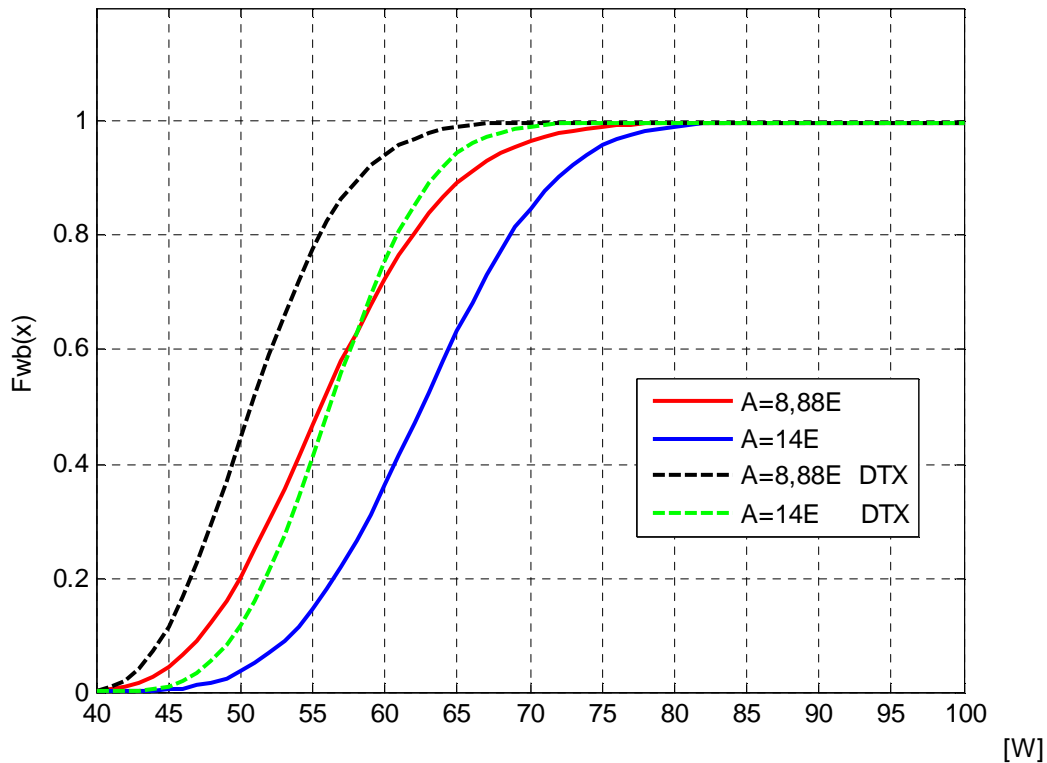
С обзиром да је у овом случају функција густине експоненцијално опадајућа, очекивано је да је CDF излазне снаге базне станице расподељена на мањим вредностима опсега снага. Сада је 90%-тна вредност CDF дате вредности саобраћаја без примене DTX је у опсегу 45-47% максималне снаге. У случају када се DTX примењује, ова вредност је у опсегу 43-45%. Ефективно смањење излазне снаге применом DTX метода је око 2%. Ово се објашњава чињеницом да је и у случају када се не примењује DTX, излазна снага мала.

Четврти случај представља комбиновани урбано-рурални модел, с параметрима  $\alpha = 2$ ,  $\beta = 2$ . Густина корисника монотонно расте од центра ка средини полупречника, а потом опада ка ивици ћелије. Функција густине бета функције за овај случај је приказана на слици 6.21.



Сл. 6.21 Функција густине вероватноће бета функције за  $\alpha = 2$ ,  $\beta = 2$ .

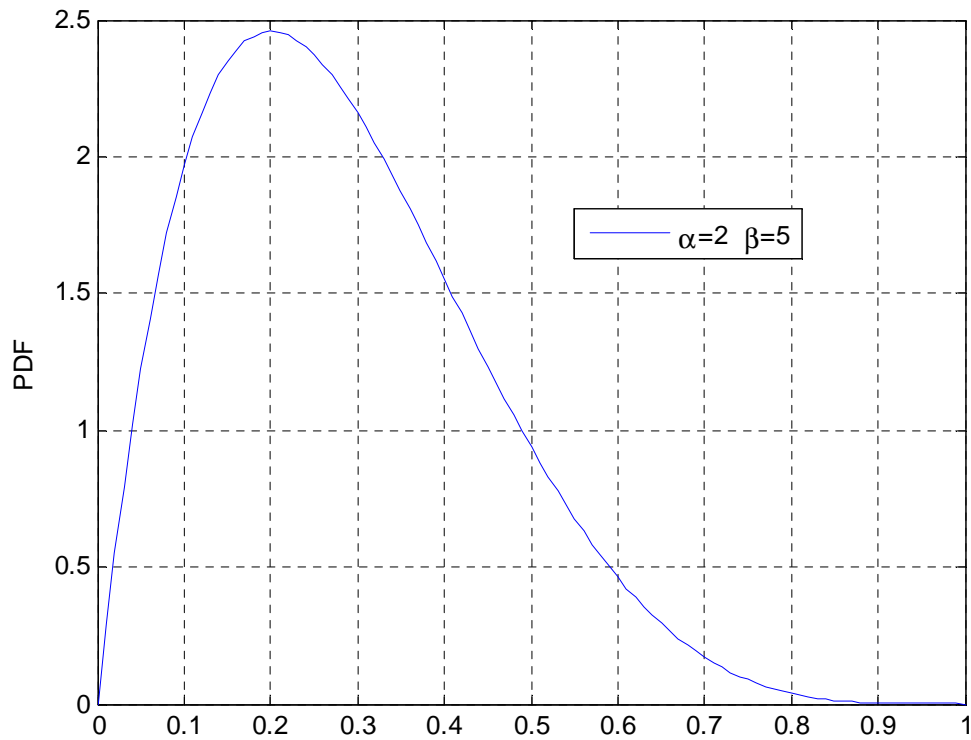
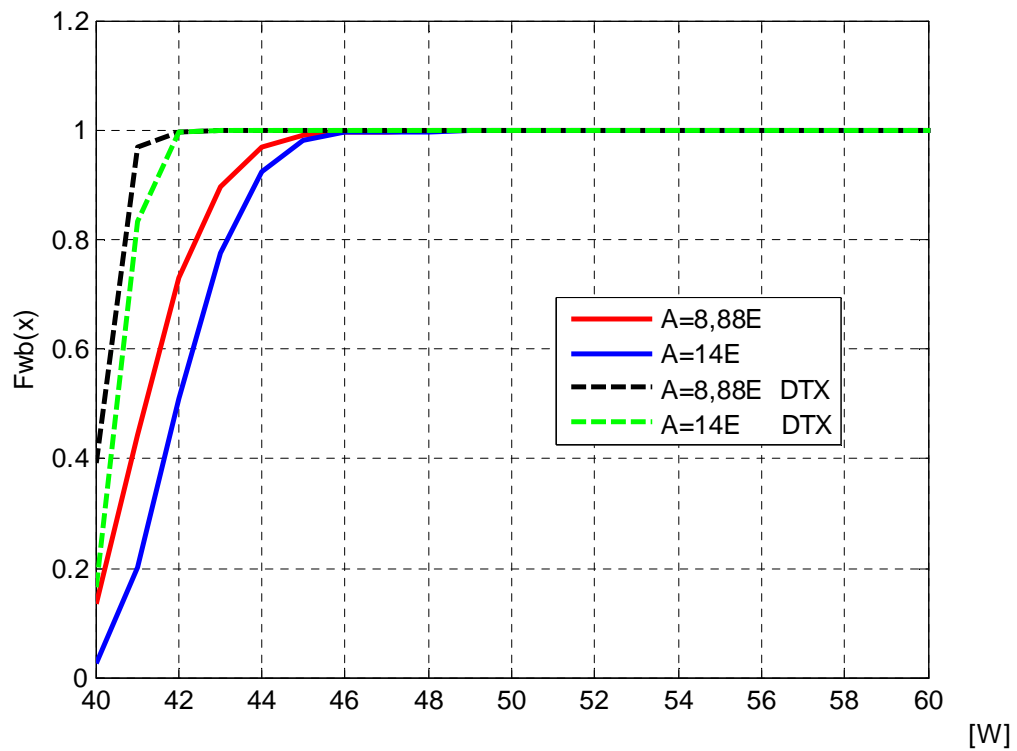
На слици 6.22 је приказана CDF излазне снаге базне станице добијена симулационим поступком.



Сл. 6.22 Поређење CDF излазне снаге базне станице у зависности од саобраћаја за случај густине са слике 6.21. ( $N = 16, w_{max} = 40 W, R = 10 km, \gamma = 3,5$ ).

У овом случају, највећи број корисника је расподељен у средини ћелије. Са графика се види да је 90%-тна вредност CDF дате вредности саобраћаја без примене DTX је у опсегу 65-73% максималне снаге. У случају када се DTX примењује, 90%-тна вредност CDF је у опсегу 57-64%. Може се извести закључак да је излазна снага смањена за око 12% применом DTX метода.

Последњи случај који се анализира представља такође комбиновани урбано-рурални модел, с параметрима  $\alpha = 2, \beta = 5$ . Густина корисника достиже максимум у близини базне станице, а потом опада идући ка ивици ћелије. Функција густине бета функције за овај случај је приказана на слици 6.23. На слици 6.24 је приказана CDF излазне снаге базне станице добијена симулационим поступком.

Сл. 6.23 Функција густине вероватноће бета функције за  $\alpha = 2$ ,  $\beta = 5$ .Сл. 6.24 Поређење CDF излазне снаге базе станице у зависности од саобраћаја за случај густине са слике 6.23. ( $N = 16, w_{max} = 40 \text{ W}, R = 10 \text{ km}, \gamma = 3,5$ ).

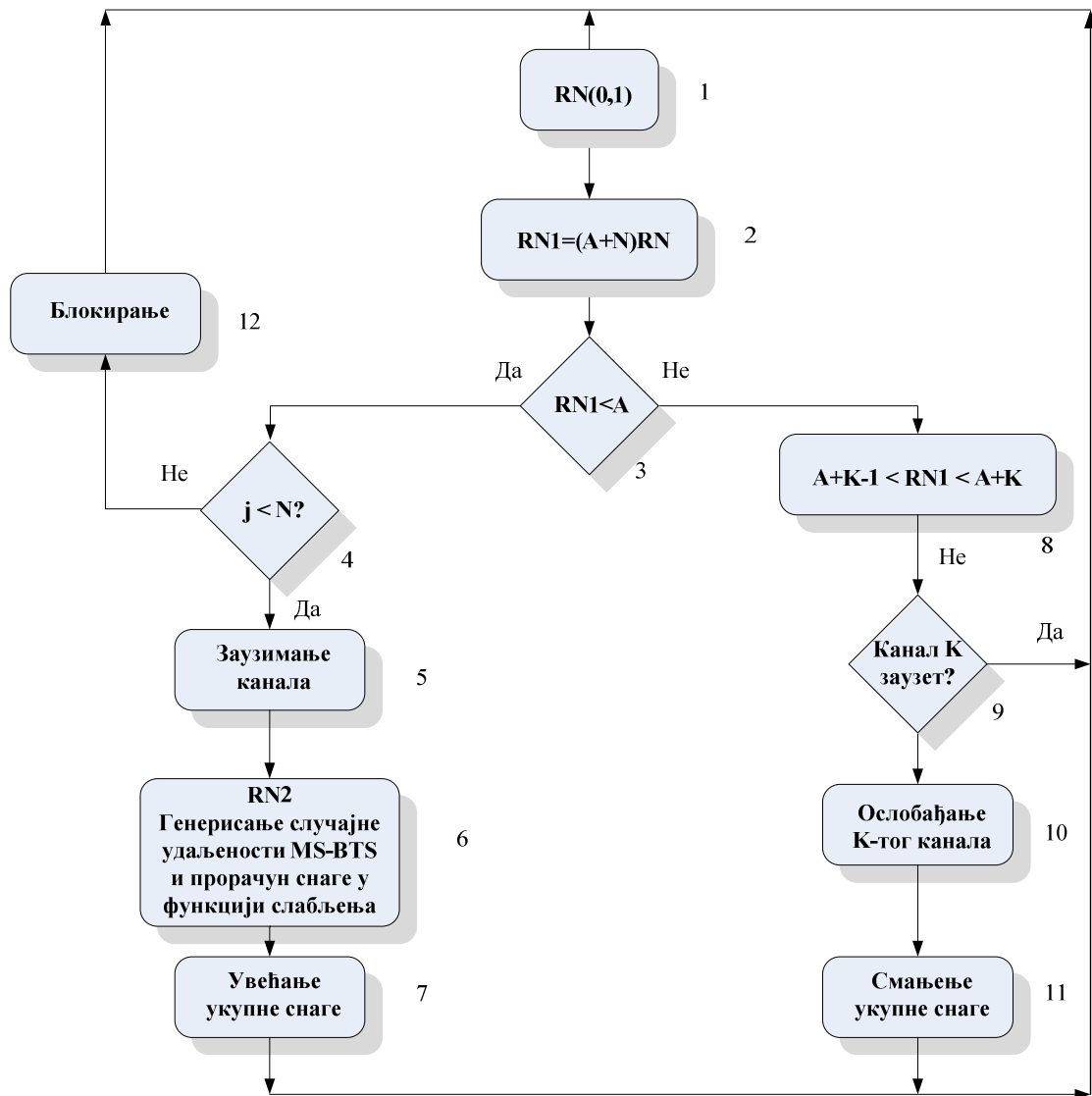
Као и у трећем случају, густина корисника је највећа у непосредној близини базне станице, те је стога очекивано да је CDF излазне снаге базне станице расподељена померена улево. Наиме, 90%-тна вредност CDF дате вредности саобраћаја без примене DTX је у опсегу 43-44% максималне снаге. У случају када се DTX примењује, 90%-тна вредност CDF је у опсегу 42-43%. Може се извести закључак да је излазна снага смањена за око 1% применом DTX метода. Сличан закључак се може извести као и у трећем случају, да услед мале излазне снаге, емитовање са прекидима не доноси значајнију уштеду.

Из претходне анализе расподеле излазне снаге базне станице могуће је извући одређене закључке. Наиме, за руралне средине код којих је изражена неравномерна расподела корисника услед рељефа, у значајном броју случајева излазна снага је расподељена на вишим вредностима снаге. Облик расподеле је сличан за сва три типа области. Иако је густина корисника знатно већа код урбаних средина, ћелија је знатно мања у односу на рурална подручја, те су стога расподеле излазних снага за ове случајеве упоредиве.

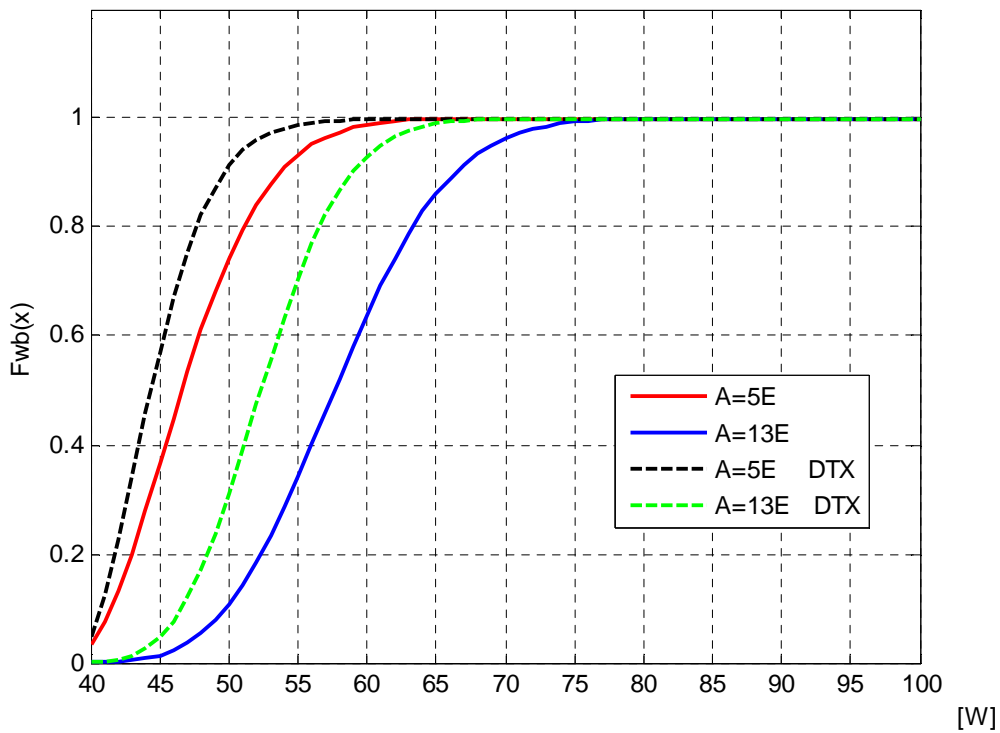
### 6.2.2. Зависност излазне снаге од слабљења сигнала

У одељку 5.2.2. претходног поглавља, анализиран је општи случај када фактор слабљења зависи од удаљености. Разматран је случај када зависност фактора слабљења и удаљености има гама расподелу. Симулација је погодан поступак за приближну процену утицаја слабљења сигнала у ћелији. Дијаграм тока симулације веома је сличан дијаграму тока за *Erlang*-ову групу с униформном расподелом корисника (слика 6.25), са том разликом што се снага другачије рачуна услед зависности фактора слабљења од удаљености. Разматрају се случајеви са слабљењем које је растуће односно опадајуће, идући од центра ћелије ка периферији. На сликама 6.26 и 6.27 је приказана зависност CDF излазне снаге базне станице од фактора слабљења за различите интензитете саобраћаја. Као што је и очекивано, показује се да је CDF излазне снаге померена више улево за случај линеарно опадајуће густине корисника, што се објашњава чињеницом да је највећи број корисника расподељен у близини базне станице.

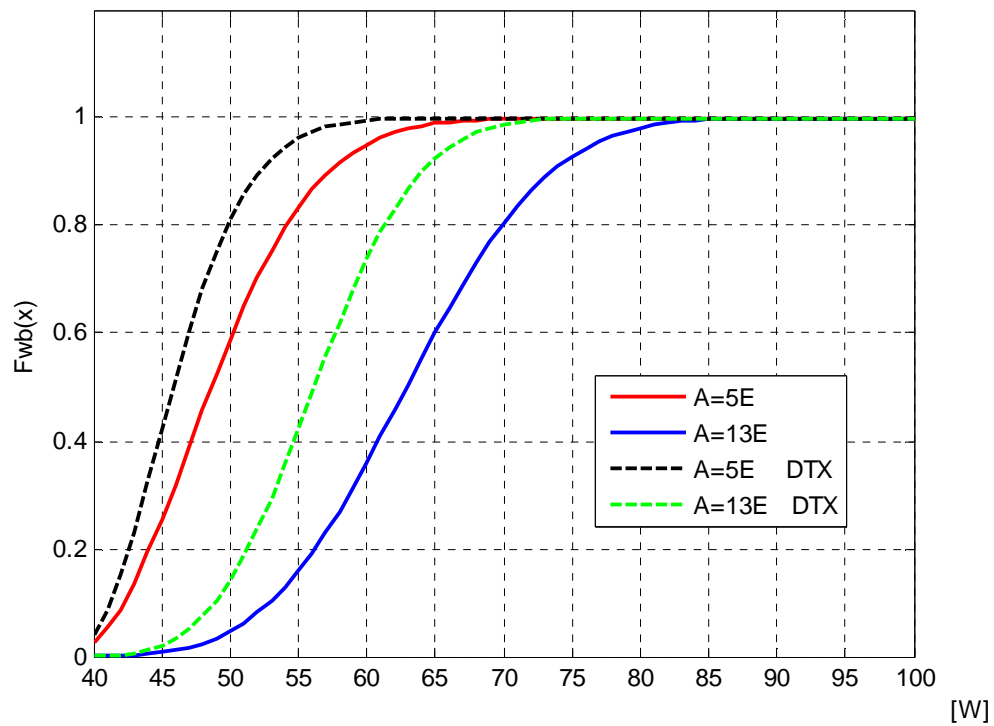




Сл. 6.25 Принциписки дијаграм тока симулације.



Сл. 6.26 Поређење CDF излазне снаге базе станице у зависности од саобраћаја за линеарно растуће слабљење од центра ка периферији ( $N = 16, w_{max} = 40$  W,  $R = 10$  km).

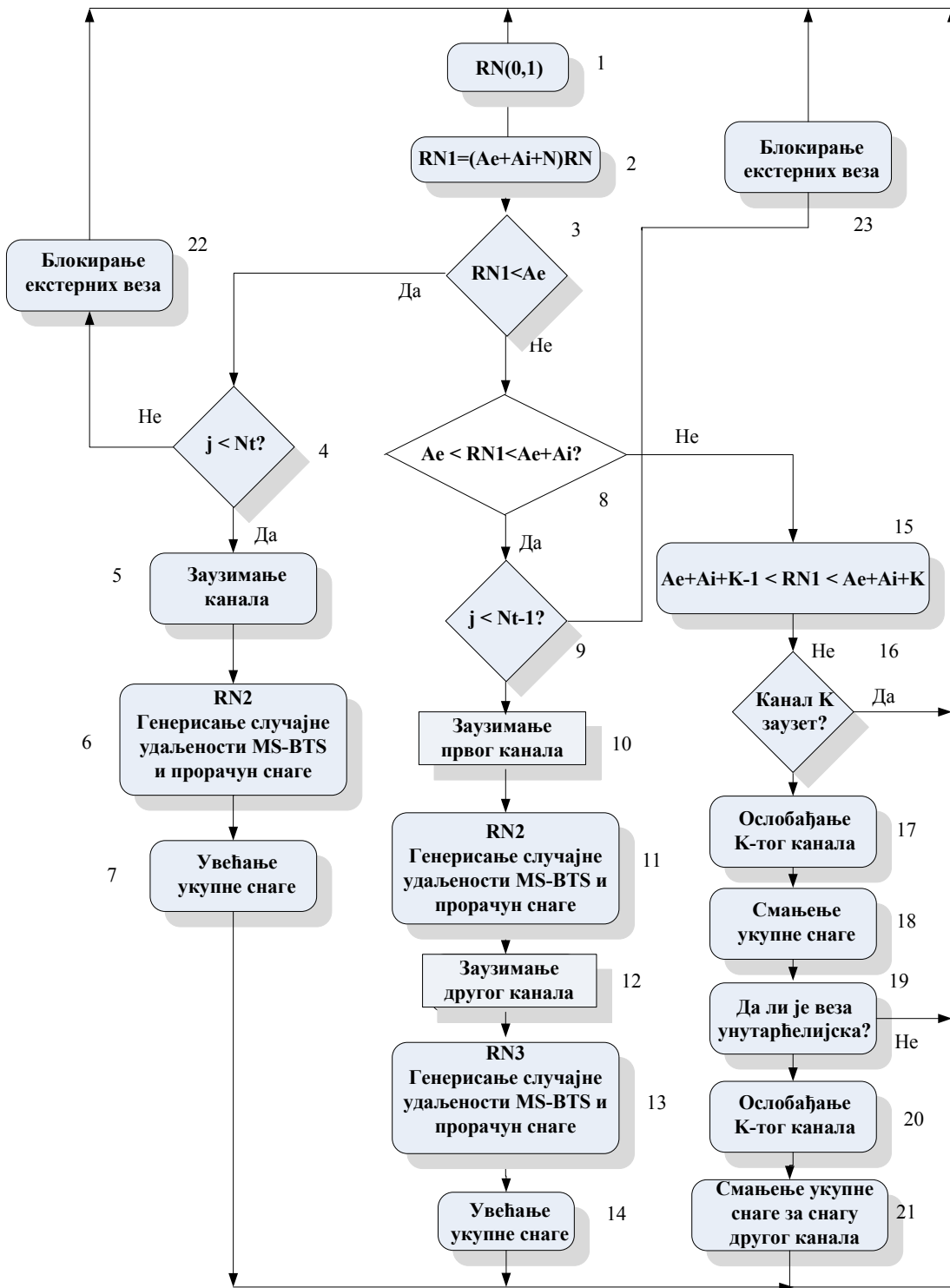


Сл. 6.27 Поређење CDF излазне снаге базе станице у зависности од саобраћаја за линеарно опадајуће слабљење од центра ка периферији ( $N = 16, w_{max} = 40$  W,  $R = 10$  km).

### 6.2.3. Зависност излазне снаге од унутарћелијског саобраћаја

У одељку 5.3.4. анализиран је утицај унутарћелијског саобраћаја у ћелији на заузимање ресурса система и излазну снагу. Резултати прорачуна овде су верификовани рачунарском симулацијом.

Разматра се GSM ћелија са  $N_t$  саобраћајних канала, где је излазна снага подешена према удаљености између мобилне и базне станице. Узима се да је густина корисника у ћелији униформна. Укупни саобраћај се може разложити на екстерну и интерну (унутарћелијску) компоненту. Понуђени екстерни саобраћај укључује одлазне и долазне позиве и означава се са  $A_e$ . Понуђени унутарћелијски саобраћај је  $A_i$ . Укупан понуђени саобраћај је  $A = A_e + A_i$ . Принциписки дијаграм тока симулационог поступка је приказан на слици 6.28.



Сл. 6.28 Принциписки дијаграм тока симулације за случај унутарћелијског саобраћаја.

Први корак у симулацији је генерисање случајног броја  $RN1$  из интервала  $(0, A_e + A_i + N_t)$ , и то је представљено блоковима 1 и 2. У зависности од вредности случајног броја  $RN1$ , могу да се јаве четири случаја:

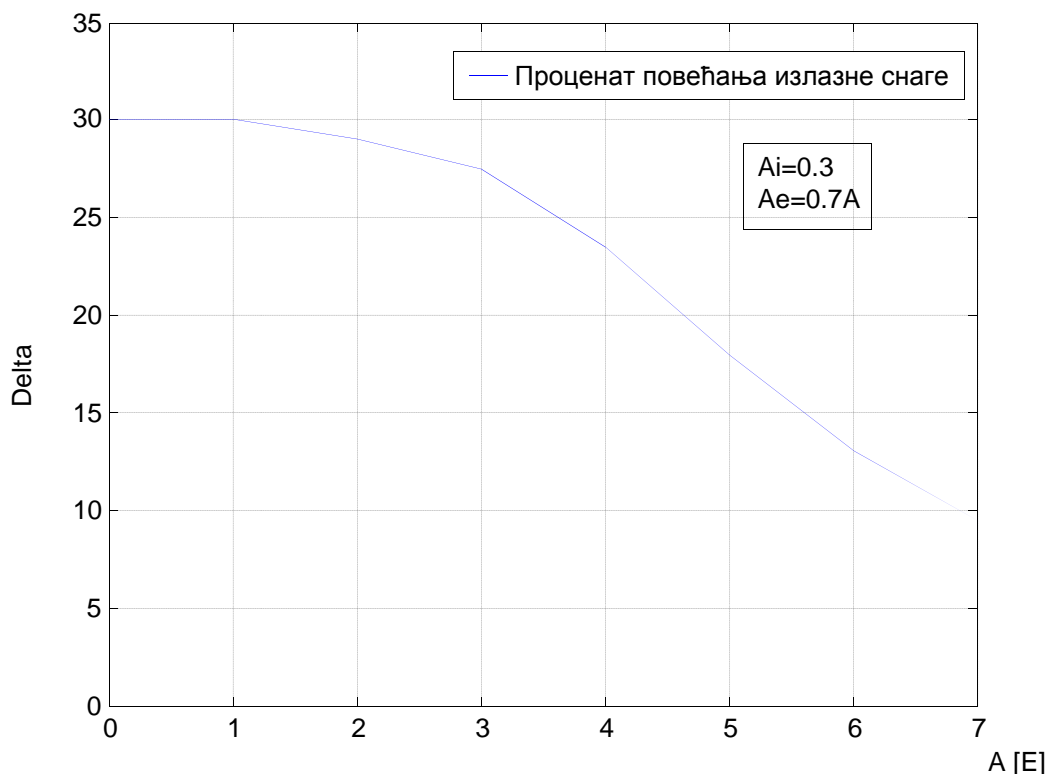
1. генерисање нове екстерне везе, ако је случајни број  $0 \leq RN_1 < A_e$  и број заузетих канала,  $j$ , у том моменту  $j < N_t$  (блокови 3, 4, 5, 6 и 7);
2. генерисање нове унутарћелијске везе, ако је случајни број у опсегу  $A_e \leq RN1 < A_e + A_i$  и број заузетих канала  $j < N_t - 1$  (блокови 8-14);
3. Завршетак постојеће везе на каналу  $K$ , ако је случајан број у опсегу  $A_e + A_i + K - 1 \leq RN1 < A_e + A_i + K$  и канал  $K$  је заузет (блокови 15-18);
4. празан догађај, ако је случајни број у опсегу  $0 \leq RN1 < A_e + A_i$ , и број заузетих канала  $j = N_t$  за екстерне везе и  $j \geq N_t - 1$  за унутарћелијске везе, или ако је случајан број у опсегу  $A_e + A_i + K - 1 \leq RN_1 < A_e + A_i + K$  и канал  $K$  је слободан.

Такође су уведена два нова генератора случајних бројева,  $RN2$  и  $RN3$ . Случајно растојање између мобилне и базне станице (и снага канала) у екстерној вези је одређено на основу случајног броја  $RN2$ , док је случајно растојање (и снага канала) за оба корисника код унутарћелијске везе одређено на основу случајних бројева  $RN2$  и  $RN3$ .

Блок 15 служи за налажење броја канала који је кандидат за ослобађање. Блок 16 одређује да ли је изабрани канал заузет. Ако јесте, блокови 17 и 18 ослобађају канал у случају екстерне везе и смањују емисиону снагу базне станице. Блок 19 одређује да ли се унутарћелијска веза прекида. Блоковима 20 и 21 се ослобађа други канал у унутарћелијској вези и смањује укупна емисона снага базне станице. Блокови 22 и 23 се користе за евиденцију изгубљених позива када се екстерне или унутарћелијске везе не могу успоставити.

Реултати добијени у одељку 5.3.4. претходног поглавља могу се јасно илустровати на примеру с конкретним бројим вредностима. Нека се посматрају две ћелије. Обе ћелије имају исти број саобраћајних канала ( $N_t = 10$ ) и исти понуђени саобраћај,  $A$ . У првој ћелији не постоји унутарћелијски саобраћај, односно постоји само екстерна компонента саобраћаја. У другој ћелији део понуђеног саобраћаја отпада на унутарћелијску компоненту,  $A_i = p \cdot A$ , а део на екстерну компоненту,  $A_e = (1 - p) \cdot A$ , где је укупан опслужени саобраћај,

$A = A_e + A_i$ . Утицај унутарћелијског саобраћаја на излазну снагу базне станице је приказан на слици 6.29. Приказан је проценат повећања излазне снаге базне станице у случају када постоји компонента унутарћелијског саобраћаја ( $p = 0,3$ ), у функцији опслуженог саобраћаја. Извршено је по пет симулација за сваку тачку и број симулираних веза је око 3000 по каналу за сваку симулацију. Резултати симулације су обрађивани тако да се процена добијених резултата за  $B_s$  с нивоом поверења 95% налази унутар интервала поверења.



Сл. 6.29 Утицај унутарћелијског саобраћаја на повећање излазне снаге базне станице ( $N = 10, w_{max} = 40 \text{ W}, R = 10 \text{ km}, \gamma = 3$ ).

Може се уочити да унутарћелијски саобраћај повећава излазну снагу базне станице у односу на случај чисто екстерног саобраћаја. Када је интензитет саобраћаја мали, повећање излазне снаге је једнако делу унутарћелијског саобраћаја. У том случају је  $B_i \approx 0$  и  $B_e \approx 0$ . Према томе, имамо да је  $Y_i \approx A_i, Y_e \approx A_e, Y \approx A$ . Из претходних једначина следи да је:

$$\Delta = 100 \cdot \frac{w_{Bmi} - w_{Bm}}{w_{Bm}} = 100 \cdot \frac{\omega_m \cdot (Y_e + 2 \cdot Y_i) - \omega_m \cdot Y}{\omega_m \cdot Y} = \quad (6.17)$$

$$= 100 \cdot \frac{(Y - Y_i) - Y}{Y} = 100 \cdot \frac{Y_i}{Y} \approx 100 \cdot \frac{A_i}{A} = 100 \cdot p.$$

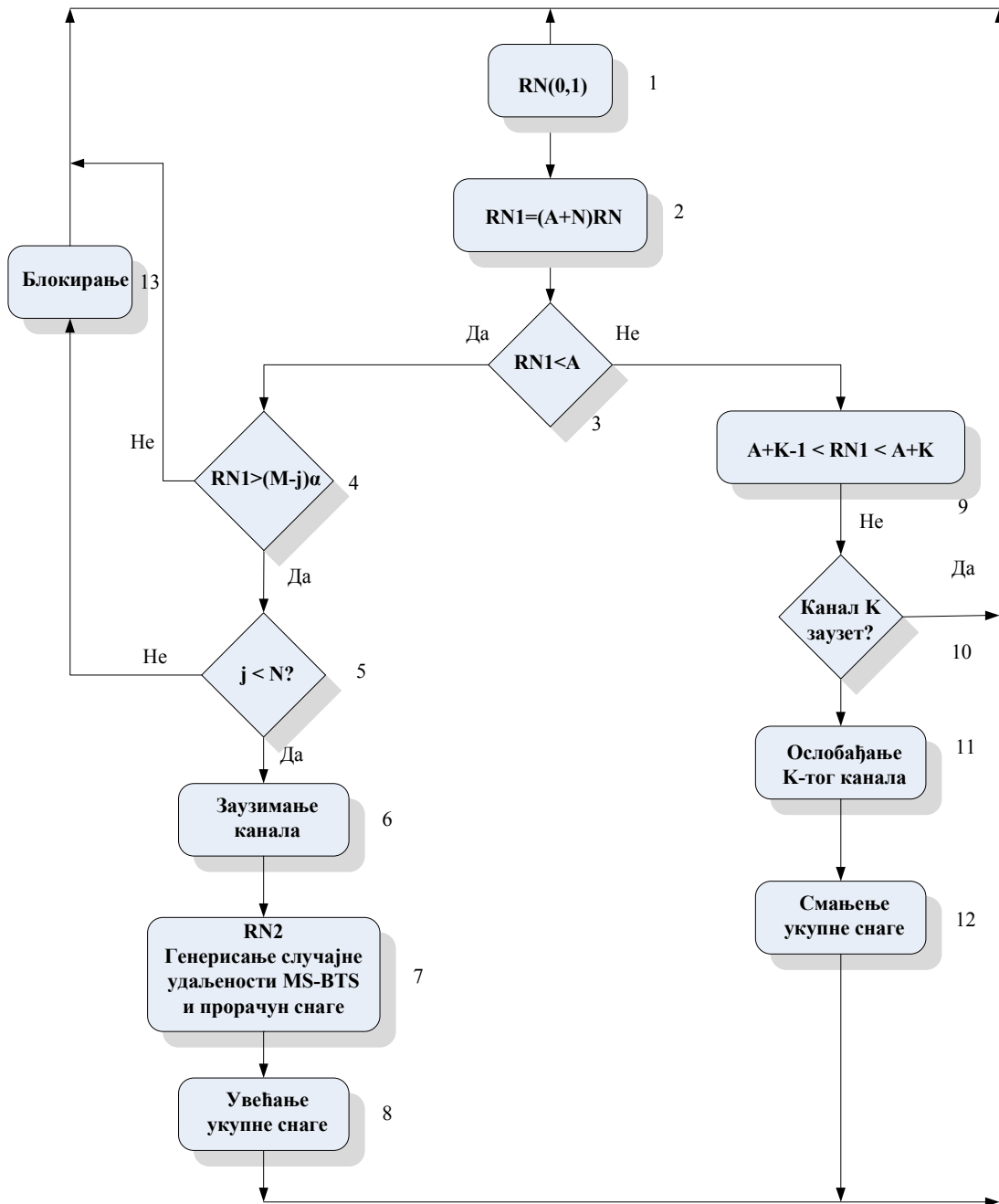
Када се понуђени саобраћај повећава, повећава се и излазна снага базне станице због смањивања унутарћелијске компоненте саобраћаја. Ова чињеница се може објаснити на следећи начин. Када се понуђени саобраћај повећава, губици услед унутарћелијског саобраћаја расту више од губитака услед екстерног саобраћаја. Из тог разлога се опслужени екстерни саобраћај повећава више од опслуженог унутарћелијског саобраћаја, и стога је повећање излазне снаге мање.

Може се закључити на основу симулације да унутарћелијски саобраћај повећава излазну снагу базне станице. Ово повећање је једнако делу унутарћелијских веза за мали интензитет саобраћаја, када нема саобраћајних губитака. Када се саобраћај повећава, саобраћајни губици унутарћелијских веза расту брже од саобраћајних губитака екстерних веза, и стога је мање релативно повећање излазне снаге базне станице. Нажалост, већи број позива се губи у овом случају. Може се рећи да је повећање излазне снаге базне станице једнако делу унутарћелијског саобраћаја све док су саобраћајни губици мањи од 1-2%. Анализа је извршена за униформну расподелу корисника у GSM ћелији, али принцип прорачуна важи и за остале расподеле корисника. Средња излазна снага зависи од слабљења сигнала услед пропагације, али релативна снага се повећава зато што унутарћелијски саобраћај не зависи од слабљења. Сличан утицај унутарћелијског саобраћаја на повећање снаге може се приметити код базних станица које немају подешавање снаге, али би тада снага била већа. Такође је евидентно да губици услед унутарћелијског саобраћаја расту знатно брже с порастом саобраћаја у поређењу с укупним губицима, који укључују и унутарћелијски и екстерни саобраћај.

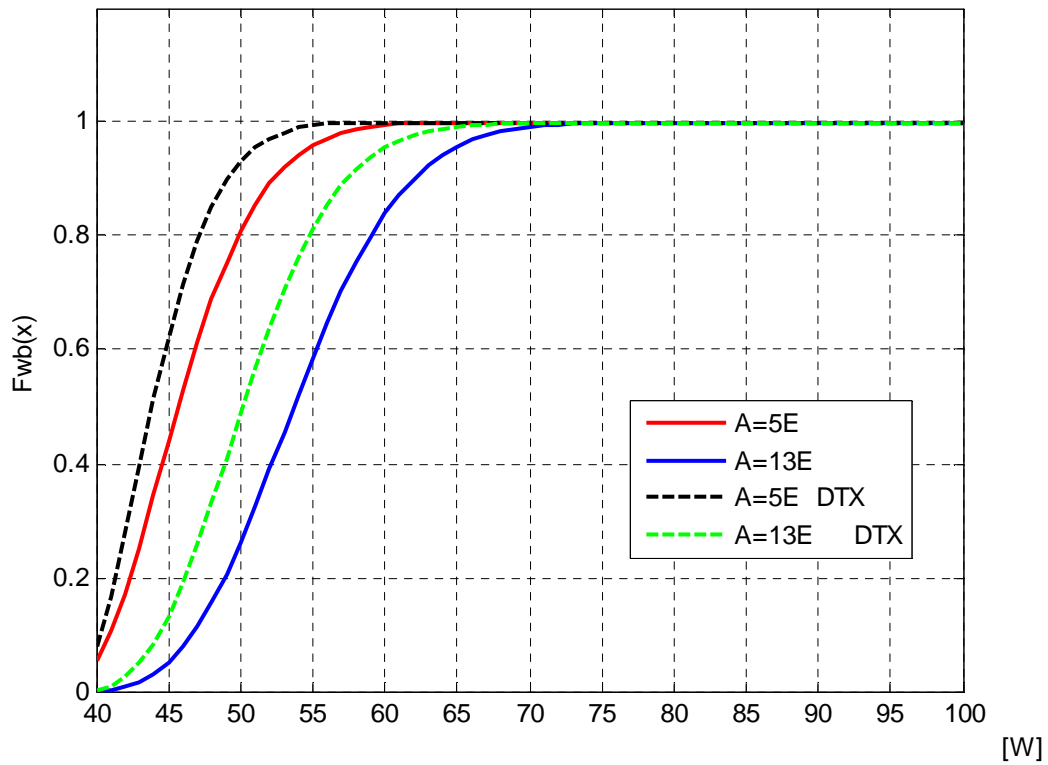
#### 6.2.4. Зависност излазне снаге од ограничености броја извора саобраћаја

У претходном одељку је приказан симулациони поступак за случај када у ћелији постоји неограничен број мобилних станица. Да би се разматрао случај коначног броја мобилних корисника у ћелији, врши се симулација на бази *Engset*-овог модела. Принциписки дијаграм тока симулације за *Engset*-ов модел је приказан на слици 6.30. Блокови 1, 2, 3, 5, 6, 9, 10 и 11 представљају делове познатог поступка симулације саобраћаја у *Erlang*-овом моделу. Блок 4 представља одређивање нове везе на основу броја слободних извора саобраћаја, према једначини (3.41). Догађаји у саобраћају (нова веза, прекид постојеће везе) се симулирају на основу генерисаног случајног броја помоћу генератора случајних бројева RNG1. Блокови 7, 8 и 12 представљају надоградњу поступка за симулациону процену излазне снаге. Блок 7 одређује случајну удаљеност MS - BTS и снагу канала за нову везу. Ова случајност се одређује на основу генерисаног случајног броја помоћу другог генератора случајних RNG2. Генератор случајних бројева RN2, такође, генерише случајне бројеве у интервалу (0,1) према униформној расподели. У циљу одређивања удаљености корисника, сагласно изворима [58] и [59], примењује се израчунавање инверзном функцијом описаном у претходним одељцима. Блок 8 евидентира увећање укупне снаге BTS за вредност снаге нове везе. Блок 12 умањује укупну снагу BTS сагласно снази канала на којем се завршава веза.

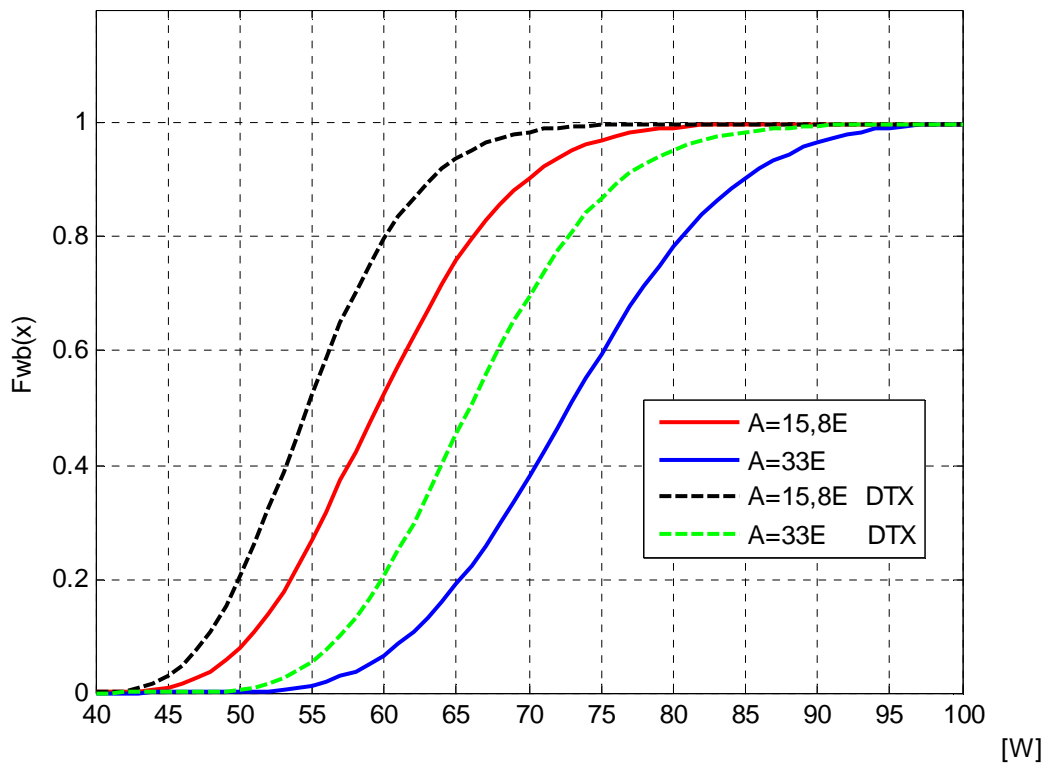


Сл. 6.30 Принциписки дијаграм тока симулације (*Engset*-ова група).

На сликама 6.31 и 6.32 је приказана зависност CDF-а излазне снаге базне станице за *Engset*-ов модел за различите вредности интензитета саобраћаја. У првом случају је број канала 16, а у другом случају 32. Разматра се базна станица у класи 4, с полупречником ћелије 10 km, фактором слабљења 4 и бројем извора саобраћаја 21 и 45, респективно.



Сл. 6.31 CDF излазне снаге базе станице (*Engset*-ов модел)  
 $(N = 16, w_{max} = 40 W, R = 10 km, \gamma = 3,5, M = 21)$ .



Сл. 6.32 CDF излазне снаге базе станице (*Engset*-ов модел)  
 $(N = 32, w_{max} = 40 W, R = 10 km, \gamma = 4, M = 45)$ .

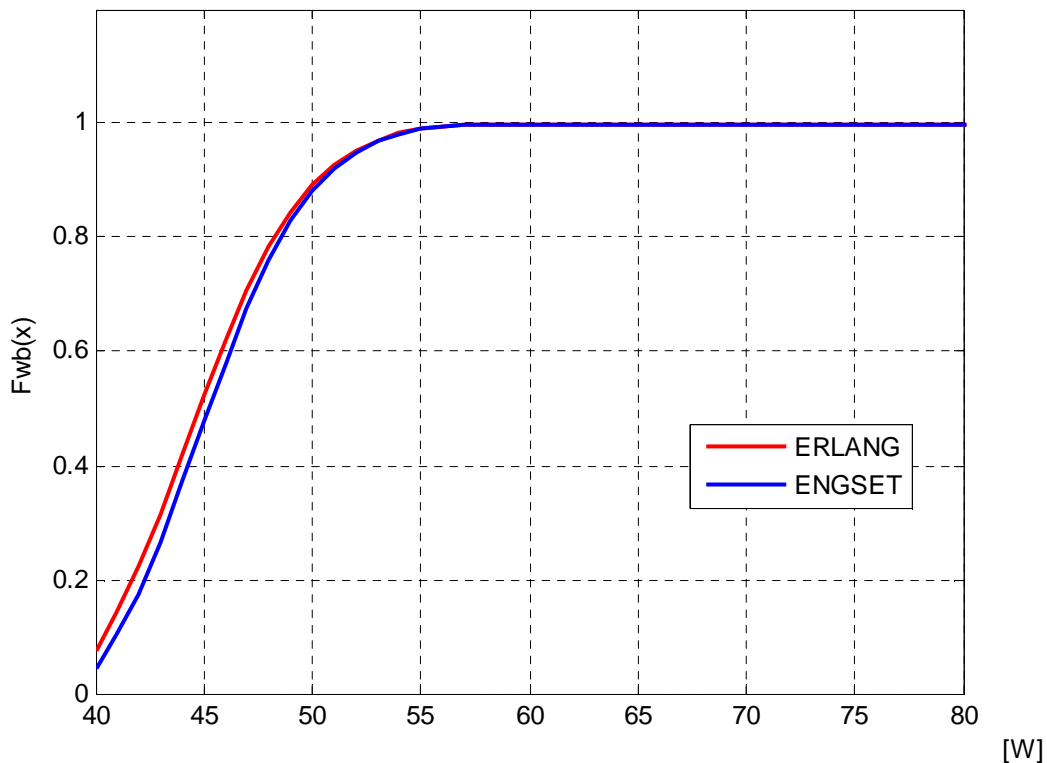
### 6.2.5. Поређење излазне снаге базе станице у ћелији са ограниченим и неограниченим бројем мобилних станица

Посматра се *Engset*-ов модел са 6 канала и 9 мобилних станица. Да би се добила вероватноће блокирања од 10%, понуђени саобраћај слободних извора треба да буде око 8,6. На основу тога може да се израчуна

$$Y = M \frac{\alpha \cdot (1 - B)}{1 + \alpha \cdot (1 - B)} \approx 4,16 \quad (6.18)$$

$$A = \frac{Y}{1 - B} \approx 4,62 \quad (6.19)$$

Потом се добијена вредност за опслужени саобраћај примени код *Erlang*-овог модела, како би се добила CDF излазне снаге базе станице. На слици 6.33 је приказано поређење CDF излазне снаге базе станице за *Erlang*-ов и *Engset*-ов модел.

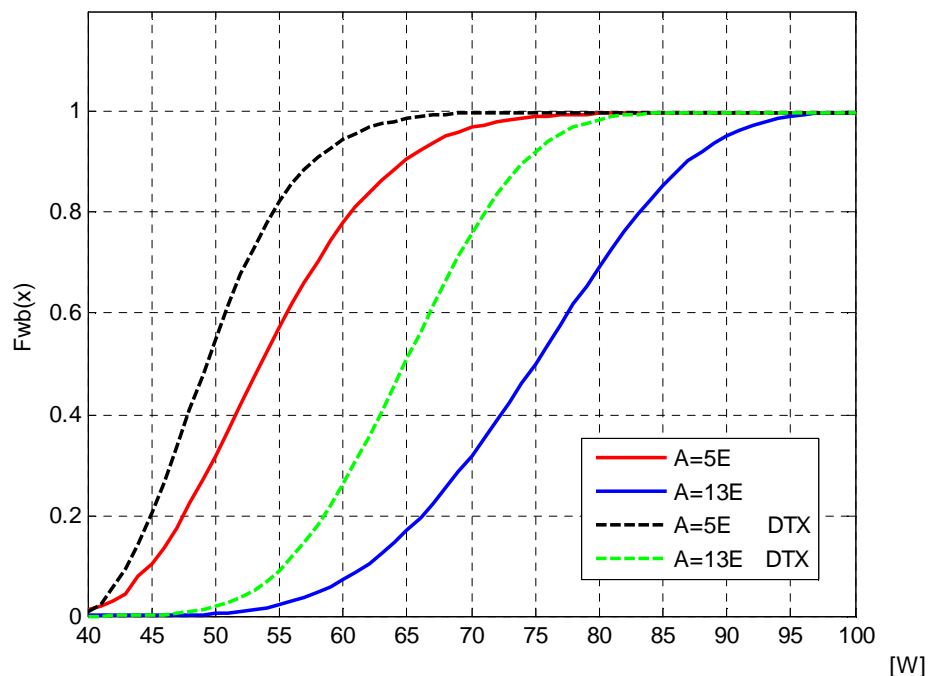


Сл. 6.33 CDF излазне снаге базе станице (поређење модела)  
 $(N = 6, A = 4,62, w_{max} = 40 W, R = 10 \text{ km}, \gamma = 4, M = 9)$ .

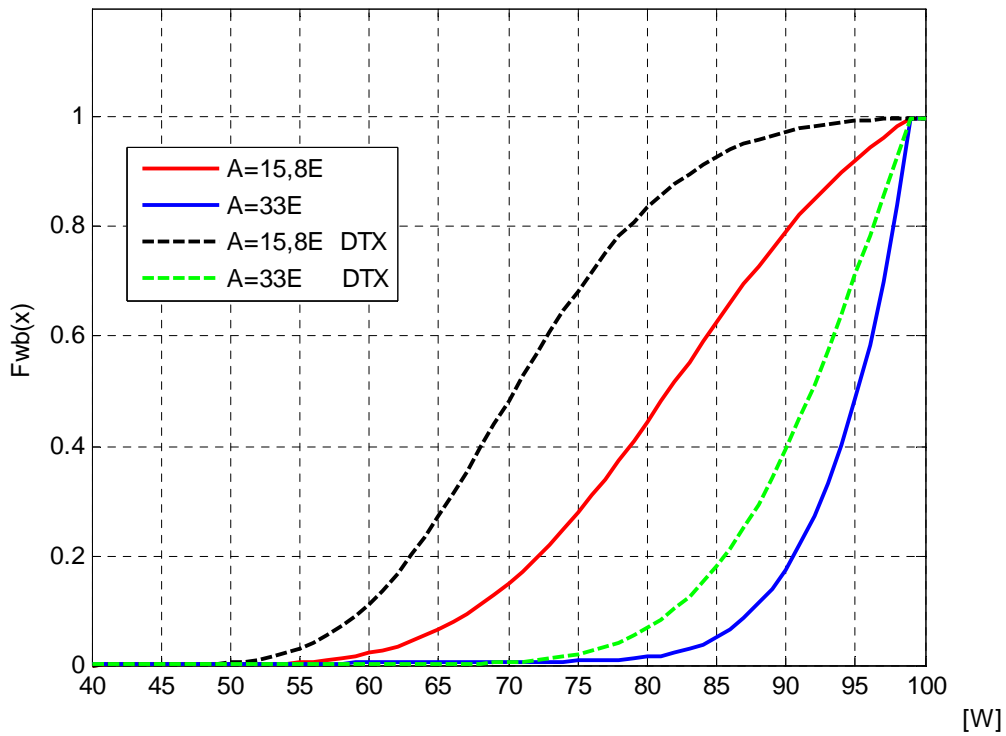
На основу графика се може доћи до помало неочекиваног закључка да је излазна снага већа за *Engset*-ов него за *Erlang*-ов модел. Разлог лежи у томе што су код *Engset*-овог модела за дати саобраћај губици мањи, па се стога заузима више канала, а то као последицу има већу снагу.

### 6.2.6. Сложени модели расподеле снаге базне станице

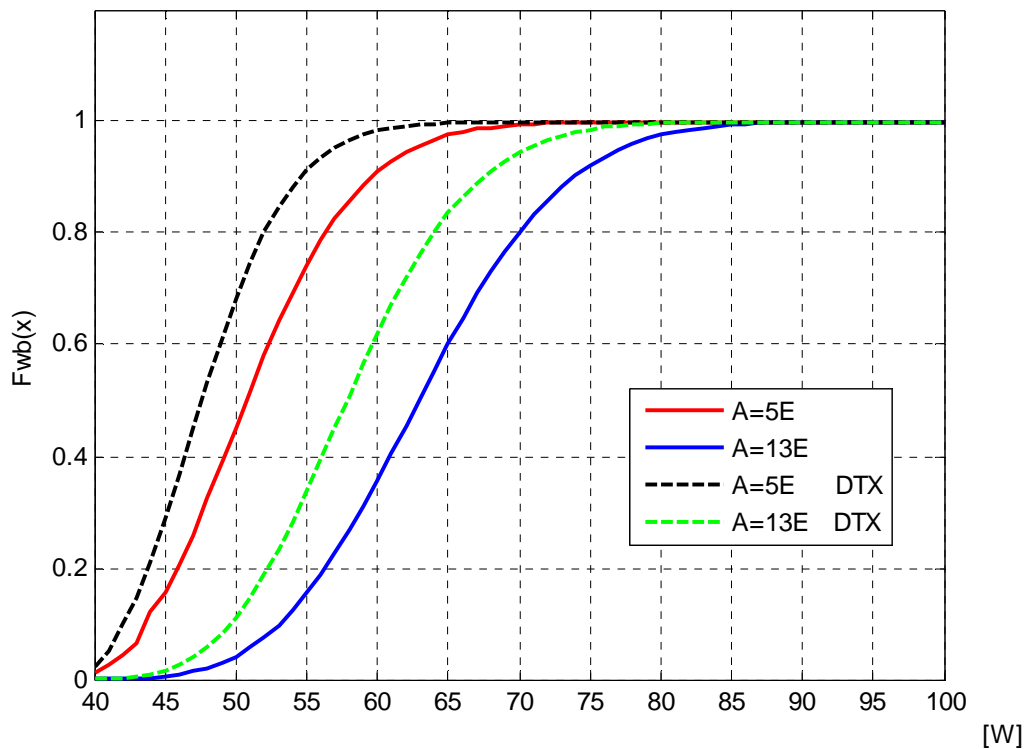
На основу модела представљених у претходним одељцима, могуће је моделирање сложенијих сценарија, који су заснованио на здруженом утицају независних случајних величина. Аналитичко решавање оваквих случајева је веома сложено, и у општем случају не постоји решење у затвореном облику. У претходним поглављима је показано да и за једноставније сценарије, некад не постоји аналитичко решење. На сликама 6.34 и 6.35, дати су модели базне станице са веома великим (неограниченим) бројем корисника у ћелији, за случај урбано-руралног подручја. На сликама 6.36 и 6.37, дати су модели базне станице с малим (ограниченим) бројем корисника у ћелији, такође за случај урбано-руралног подручја.



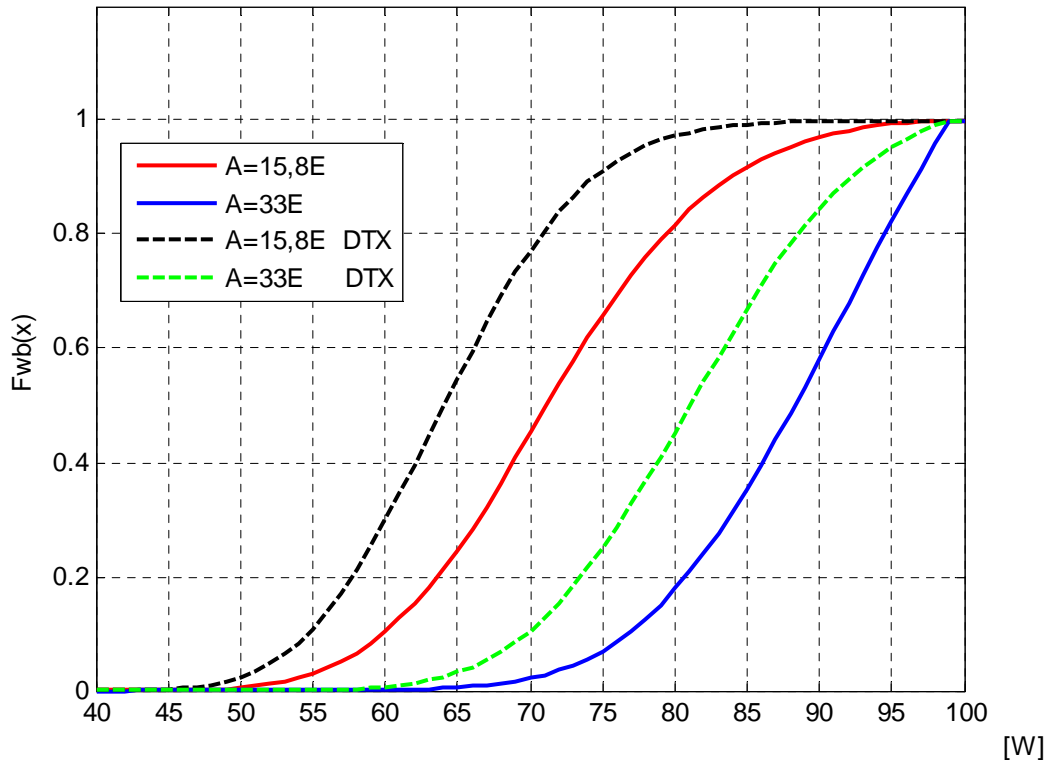
Сл. 6.34 CDF излазне снаге базне станице за велики број корисника ( $N = 16$ ,  $w_{max} = 40$  W,  $\alpha = 0,5$ ,  $\beta = 0,5$ ,  $R = 10$  km,  $\gamma$ -линеарно опадајућа густина).



Сл. 6.35 CDF излазне снаге базе станице за велики број корисника ( $N = 32$ ,  $w_{max} = 40$  W,  $\alpha = 5$ ,  $\beta = 1$ ,  $R = 10$  km,  $\gamma$ -линеарно растућа густина).



Сл. 6.36 CDF излазне снаге базе станице за мали број корисника ( $N = 16$ ,  $M = 21$ ,  $w_{max} = 40$  W,  $\alpha = 0,5$ ,  $\beta = 0,5$ ,  $R = 10$  km,  $\gamma$ -линеарно опадајућа густина).



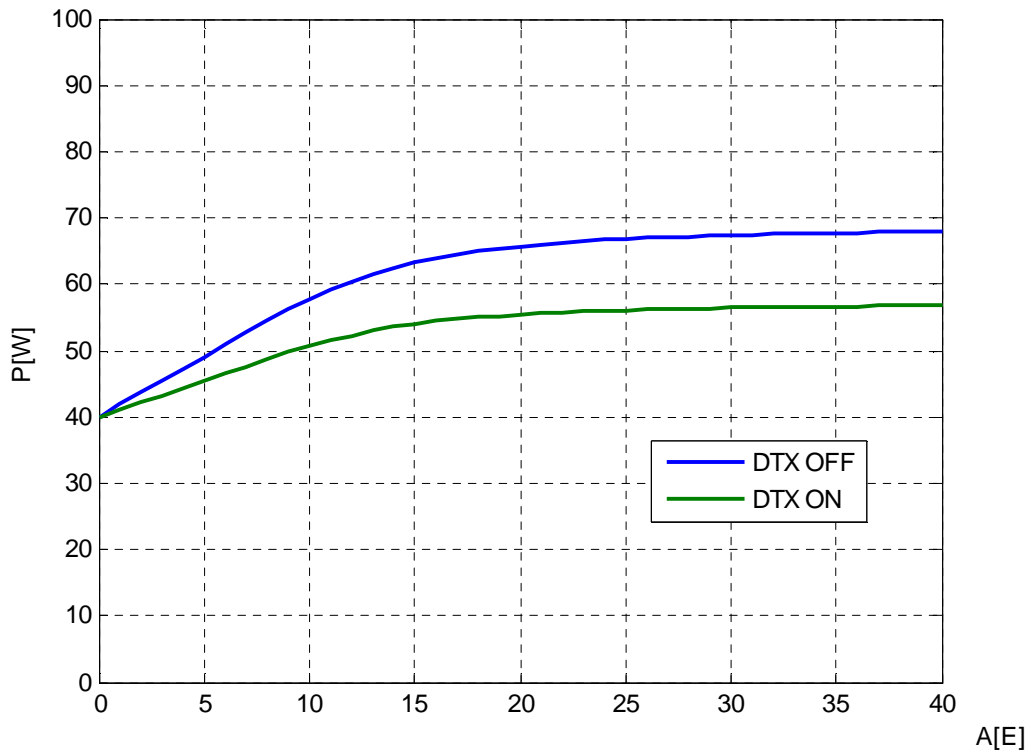
Сл. 6.37 CDF излазне снаге базе станице за мали број корисника ( $N = 32$ ,  $M = 45$ ,  $w_{max} = 40 W$ ,  $\alpha = 5$ ,  $\beta = 1$ ,  $R = 10 km$ ,  $\gamma$ -линеарно растућа густина).

На претходним графицима, дата је расподела излазне снаге базе станице за случајеве када постоји више независних случајних величина, које доприносе облику расподеле снаге. Моделирање оваквих случајева аналитичким путем је, у општем случају, веома сложено. Стога се јасно види значај поузданих и брзих симулационих модела базе станице, на бази којих је могуће развијати ефикасне алгоритме за контролу излазне снаге базе станице у циљу повећања енергетске ефикасности.

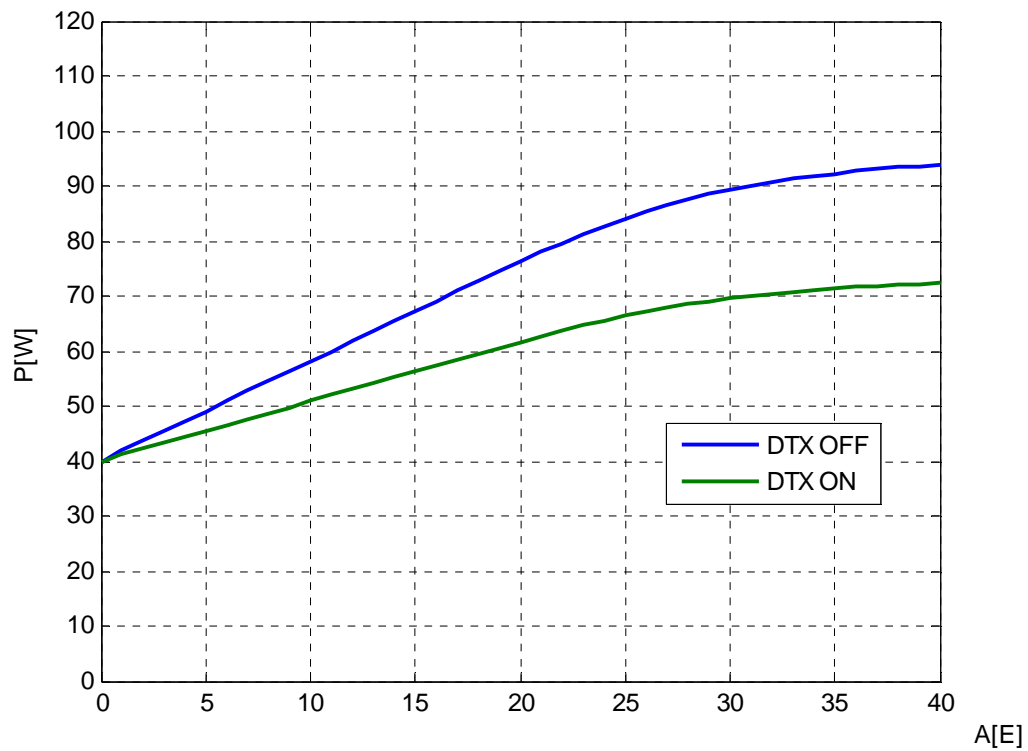
### 6.2.7. Зависност средње излазне снаге базе станице од интензитета саобраћаја

Претходна анализа расподеле излазне снаге базе станице у зависности од различитих чинилаца се може сумирати одређивањем зависности средње снаге базе станице од интензитета саобраћаја. На наредним графицима, дата је зависност средње излазне снаге базе станице од интензитета саобраћаја за случај 3

и 5 носиоца, када се примењује односно не примењује емитовање са прекидима. Расподела корисника у ћелији је униформна.



Сл. 6.38 Средња снаге базе станице ( $N = 16$ ,  $w_{max} = 40$  W,  $R = 10$  km,  $\gamma = 3,5$ ).



Сл. 6.39 Средња снаге базе станице ( $N = 32$ ,  $w_{max} = 40$  W,  $R = 10$  km,  $\gamma = 3,5$ ).

Са графика је могуће уочити да постоји линеарна зависност средње излазне снаге од саобраћајног оптерећења за ниже вредности интензитета саобраћаја. У случају са 3 носиоца (ВССН + 2 ТСН), линеарни опсег зависности снаге од саобраћајног оптерећења је до вредности интензитета саобраћаја од 15Е, док је у случају са 5 носиоца (ВССН + 4 ТСН) та вредност 25Е. Изнад опсега линеарности, зависност средње снаге од интензитета саобраћаја постаје нелинеарна и нагиб криве се смањује, што се може објаснити повећањем саобраћајних губитака при успостављању везе односно генерисања саобраћаја у мрежи мобилне телефоније.



## **7. Анализа и дискусија резултата**

## **7.1 Анализа резултата истраживања**

Централна тема ове докторске дисертације је развој аналитичког и симулационог модела за процену излазне снаге једног канала и базне станице у којој се примењује динамичка контрола снаге. Модел је заснован на посматрању једне ћелије у којој је у првој апроксимацији расподела густине корисника униформна. Основна претпоставка код прорачуна снаге једног канала је да су процеси успоставе и раскидања везе у потпуности случајни. У општем случају, време настанка позива и трајања истог су независне случајне променљиве. У предложеном моделу је уведена и трећа случајна променљива величина а то је удаљеност мобилне од базне станице. На овај начин снага једног канала постаје зависна случајна величина која се може израчунати. Анализа почиње формулисањем аналитичког модела, који се потом верификује симулационим. Аналитички прорачун је везан за модел једног канала, пошто је за анализу групе канала потребно решавање веома сложених конволуционих интеграла, који у општем случају и немају увек аналитичко решење. Аналитички је могуће за неке случајеве израчунати средњу снагу базне станице, међутим, одређивање расподеле снаге је задатак од већег интереса. Процена расподеле излазне снаге је тема овог истраживања, те се стога ослањамо на поуздан симулациони модел базне станице.

Аналитички модел показује да функција расподела излазне снаге једног канала и средња вредност излазне снаге једног канала не зависи од саобраћаја на каналу. Даље, показује се да је средња вредност снаге једног канала једнака половини максималне снаге само у идеалним условима преноса, а у реалним је увек мања.

Излазна снага базне станице је зависна од тренутне вредности интензитета саобраћаја. Показује се да је средња вредност излазне снаге једнака производу вредности опслуженог саобраћаја и средње снаге којом један канал доприноси снази. Овај закључак је веома погодан за израчунавање укупне снаге на корисничким каналима. Наиме, за сваку базну станицу може се доћи до дневног саобраћајног профила тј. зависности обима саобраћаја од доба дана. На основу дневног саобраћајног профила базне станице и зависности снаге од интензитета саобраћаја, може се доћи до дневног саобраћајног профила утрошене енергије.

Код анализе утицаја слабљења сигнала на расподелу излазне снаге базне станице, показано је да за случајеве линеарно растуће и опадајуће функције слабљења интеграл за прорачун CDF нема аналитичко решење. Потом је анализа уопштена увођењем гама расподеле за моделовање слабљења сигнала и такође је показано да не постоји аналитичко решење.

Верификација резултата добијених аналитичким путем се врши брзим али надасве поузданим симулационим поступком. Поузданост симулационог модела је показана на једном веома специфичном примеру, који се ретко среће у пракси. Наиме, тренутна снага канала је случајна величина, те стога је укупна снага групе канала сума независних случајних променљивих. Густина суме независних случајних променљивих се своди на конволуцију  $n$ -тог степена чији је прорачун сложен. За случај квадратне зависности слабљења сигнала, тренутне снаге по каналима имају униформну расподелу, а сума независних случајних променљивих са униформном расподелом одговара *Irwin-Hall*-овој расподели. На основу ње је могуће извести израз за укупну излазну снагу базне станице. За овај теоријски а у пракси редак случај постоји добро поклапање резултата аналитичког поступка и симулационог модела. Тиме је потврђена тачност и поузданост симулационог модела и стога се на даље може оправдано сматрати да ће симулација бити поуздана и у сложеним случајевима где није могуће добити аналитичко решење.

Резултати симулације су добијени за различите вредности саобраћајног оптерећења (доба дана), и у случајевима када се примењује односно не примењује емитовање са прекидима. Претпостављено је да је удео говорног саобраћаја у укупном саобраћају 70%, што одговара реалном сценарију у GSM. Интуитивно је јасно да ће емитовање са прекидима утицати на смањење излазне снаге, што резултати симулације јасно показују.

Спроведена је опсежна анализа утицаја густине корисника у ћелији на расподелу излазне снаге базне станице. Густина корисника за урбане, урбаноруралне и руралне области је моделирана бета расподелом. Избор ове расподеле превасходно је био одређен њеном општошћу. Показује се да је облик CDF излазне снаге базне станице сличан за сва три типа области. Највећа излазна снага се јавља код руралних области, где се корисници налазе на ободу ћелије чији је полупречник неколико километара. Мања излазна снага се јавља у случајевима

када су корисници расподељени у непосредној близини базне станице. Код урбаних области ћелије су знатно мање, али због веће густине корисника је излазна снага базне станице упоредива са случајем код руралне области.

Потом је приказан нови поступак прорачуна броја потребних радио канала у GSM ћелији ван градског подручја (ћелија у руралном подручју). Поступак је развијен као доказ да GSM ћелије у руралном подручју имају већу потрошњу код остваривања веза него ћелије са истим саобраћајним профилем у урбаним областима. Основи разлог за повећану потрошњу GSM ћелија у руралним областима је већа заступљеност унутарћелијских веза него у урбаним областима. Наиме, у GSM ћелији која покрива мање насељено место (или већу фирму) већа је вероватноћа успоставе везе са корисником из исте ћелије. Уз претпоставку да се сваком кориснику додељује један цели радио канал, јасно је да се унутарћелијска веза остварује заузимањем два канала односно потрошња енергије је двоструко већа у овом случају. Повећање излазне снаге базне станице услед унутарћелијског саобраћаја једнако је делу унутарћелијских веза за мали интензитет саобраћаја, када нема саобраћајних губитака. Када се саобраћај повећава, саобраћајни губици унутарћелијских веза расту брже од саобраћајних губитака екстерних веза, и стога је мање релативно повећање излазне снаге базне станице. Нажалост, већи број позива се губи у овом случају. Може се рећи да је повећање излазне снаге базне станице једнако делу унутарћелијског саобраћаја све док су саобраћајни губици мањи од 1-2%. Анализа је извршена за униформну расподелу корисника у GSM ћелији, али принцип прорачуна важи и за остале расподеле корисника

Даље, извршено је поређење модела базне станице у ћелији са ограниченим и неограниченим бројем корисника. Резултати указују да је излазна снага већа за случај са ограниченим бројем корисника (*Engset*-ов модел) него за случај са неограниченим бројем (*Erlang*-ов модел). Разлог је то што су код *Engset*-овог модела за дати саобраћај губици мањи, те се стога заузима више канала, а то као последицу има већу снагу.

На крају су приказани сложени симулациони модели базне станице који уз утицај интензитета саобраћаја истовремено третирају и утицаје густине корисника у ћелији и слабљења сигнала.

## 7.2 Области практичне примена резултата

Дискусија добијених резултата може се даље усмерити ка примени истих у пракси. Главна примена добијених резултата је у области повећања енергетске ефикасности GSM базних станица. Може се наћи више узрока за малу енергетску ефикасност у GSM. Један од главних узрока је значајан број неискоришћених базних станица, услед чињенице да оне непрекидно врше сигнализацију преко ВССН канала, као и надгледање нових долазних позива мобилних станица. Услед ових процеса се енергија троши чак и када нема корисничког саобраћаја. Даље, саобраћајно оптерећење у мрежи варира у зависности од доба дана и ноћи. С обзиром на чињеницу да базна станица континуално емитује снагу ВССН носиоца без обзира на интензитет саобраћаја, током ноћи је снага ВССН носиоца неискоришћена због малог обима саобраћаја. Према томе, у периодима када је интензитет саобраћаја мали, поготову током ноћи, неки од предајника или сектора базне станице могу да се пребаце у *standby* мод или мод искључења преко контролера базне станице, без утицаја на сервисе и капацитет. Процена је да је могућа уштеда енергије око 46% [28] искључивањем снаге ВССН носиоца или предајника у периодима малог интензитета саобраћаја, или евентуалним пребацивањем у *sleep* мод. Када се интензитет саобраћаја повећа, корисницима је обезбеђен сервис коришћењем других преклапајућих ћелија у систему. Овај метод уштеде има смисла у урбаним срединама, где су број базних станица и густина корисника велики, па стога је и обим саобраћаја велики. Другим речима, у урбаним срединама се преклапају дијаграми зрачења, па се искључивањем појединих базних станица (сектора) не нарушава покривеност. Руралне станице, које услужују огромне сервисне зоне, не могу се искључивати. Стога се јасно види и значај ефикасних алгоритама за оптимизацију контроле снаге у овом случају.

Предложени аналитичко-симулациони метод може принципски бити интегрисан у различите алгоритме за оптимизацију контроле излазне снаге базне станице. Наиме, подаци који се добијају мерењима које врши базна станица, могу се користити у симбиози са предложеним симулационим методом, како би се дефинисали различити алгоритми контроле снаге у циљу ефикасне и поуздане

процене тренутне расподеле излазне снаге базне станице, на бази које би се вршило динамичко управљање снагом у циљу смањења потрошње.

Други битан аспект са којег може да се разматра значај и примена добијених резултата докторске дисертације је заштита здравља људи и животне средине од нејонизујућег зрачења [44,45]. Проблем зрачења посебно је изражен у урбаним срединама. Утицај електромагнетних таласа на људе има кумулативан карактер и директно је сразмеран дужини непрекидне изложености истим. Базне станице спадају у велике изворе нејонизујућег зрачења, те је стога императив смањивање израчене снаге у ситуацијама када се не нарушава покривеност односно квалитет сервиса. Дефинисање алгоритама за контролу снаге осим што омогућава уштеду енергије, има благотворно дејство и на животну средину због смањивања обима нејонизујућег зрачења. Стога резултати приказани у овој докторској дисертације могу се разматрати двојако, са једне стране са становишта повећања енергетске ефиканости, а са друге стране са становишта доприноса заштити људског здравља и животне средине од штетног зрачења.

## **8. Закључак**

Важност и значај резултата истраживања представљених у овој докторској дисертацији проистиче из велике потребе за уштедом енергије у телекомуникацијама. Основни предуслов за уштеду енергије је познавање својстава и зависности снаге у поступцима остваривања веза. У овој дисертацији приказани су аналитичко-симулациони методи за процену излазне снаге базне станице у GSM мрежи. Циљ истраживања је био да се на брз, једноставан и напредан начин омогући процена снаге базне станице. Познавањем зависности излазне снаге базне станице од различитих чинилаца омогућава се дефинисање стратегија за уштеду енергије. Према томе, побољшање енергетске ефикасности је захтев који је дефинисао и усмерио токове овог истраживања.

Основна полазна претпоставка, која је у потпуности оправдана, је да се у овој дисертацији излазна снага базне станице посматра као случајна величина која зависи од независних случајних величина попут интензитета саобраћаја, густине корисника, слабљења сигнала итд. У начелу, аналитички је веома тешко или, пак, у неким случајевима и није могуће, наћи решење у затвореном облику. Могуће решење за овај проблем је коришћење одговарајућих симулационих поступака чији је значај у анализи расподеле излазне снаге базне станице у GSM веома велики. Истраживање представљено у овој дисертацији је отворило различита питања на основу који су дати доприноси у циљу повећања енергетске ефикасности. Један од основних доприноса рада је развој аналитичко-симулационог метода за прорачун излазне снаге једног канала и базне станице у случају када се користи динамичка контрола снаге.

У анализи излазне снаге GSM базне станице, разматрана је кумулативна функција расподеле као најпогоднија величина јер даје податке и о израченој снази и о временској расподели. Анализа расподеле излазне снаге базне станице је у општем случају сложена, јер укључује и прорачун израчене снаге на сваком каналу и утицај интензитета саобраћаја. Из тог разлога су уведене одговарајуће претпоставке и апроксимације, које знатно олакшавају прорачун а не утичу значајно на квалитет решења.

У циљу поједностављења анализе, посматрана је ћелија идеалног кружног облика, с базном станицом у центру и униформном густином корисника. Усвојено



је да снага канала зависи само од удаљености мобилне од базне станице. Поузданост симулационог поступка је показана на специфичном примеру квадратне зависности слабљења сигнала, где тренутне снаге по каналима имају униформну расподелу, те се CDF групе канала може одредити помоћу *Irwin-Hall*-ове расподеле. Показано је да постоји добро поклапање резултата симулације са онима добијеним аналитичким путем, чиме је потврђена поузданост симулационог поступка и оправданост његове даље примене у сложенијим случајевима.

Утврђивање утицаја слабљења сигнала на расподелу снаге базне станице започето је анализом једноставног случаја, када је фактор слабљење у ћелији константан. Потом је анализа усмерена ка фактору слабљења који у општем случају зависи од удаљености мобилне од базне станице. Показује се да чак и за једноставне зависности фактора слабљења од удаљености, аналитичко решење у општем случају не постоји, чиме је значај поузданог симулационог поступка у овом случају вишеструко наглашен.

У даљем излагању приказана је анализа утицаја густине корисника у ћелији на расподелу излазне снаге базне станице. Кренувши од најједноставнијег случаја, где су корисници униформно расподељени у ћелији, анализа је проширена за произвољну густину корисника. У првом кораку су анализиране линеарне и експоненицијалне густине корисника за које је могуће извести аналитичко решење, а потом је је анализа уопштена увођењем генералисаних функција (бета расподела) за моделирање густине корисника у урбаним, урбаноруралним и руралним областима.

Следећи допринос рада је сагледавање утицаја унутарћелијског саобраћаја на расподелу излазне снаге базне станице. Наиме, развијен је нови поступак прорачуна броја потребних радио канала у GSM ћелији у руралном подручју. Може се закључити на основу анализе таквог сценарија, да унутарћелијски саобраћај повећава излазну снагу базне станице.

Предложен је нови поступак за прорачун утицаја малог броја корисника (извора) који генеришу велики обим саобраћаја. Наиме, извршена је анализа

утицаја ограниченог броја извора на излазну снагу, као и поређење *Erlang*-овог и *Engset*-овог модела. Изведен је закључак да је излазна снага већа за *Engset*-ов него за *Erlang*-ов модел, што је последица мањих губитака *Engset*-овог модела.

Даље, допринос докторске дисертације се огледа и у предлогу алгоритама за симулацију различитих сценарија који могу карактерисати мобилне мреже. Остали доприноси односе се на дефинисање, израчунавање и проверу веродостојности и ефикасности спроведеног поступка: вероватноћу стања, вероватноће блокирања итд.

Према свему наведеном, допринос дисертације се можети сажети на следеће поступке изналажења зависности излазне снаге базне станице:

- поступак одређивања средње снаге, густине расподеле и функције расподеле снаге једног радио канала у GSM ћелији,
- поступак одређивања средње снаге, густине расподеле и функције расподеле снаге групе радио канала у GSM ћелији,
- поступак прорачуна средње снаге једног канала у GSM ћелији у зависности од слабљења сигнала,
- поступак за утврђивање зависности средње снаге, густине вероватноће и функције расподеле вероватноће снаге једног канала у зависности од густине корисника у ћелији,
- поступак за утврђивање зависности средње снаге, густине вероватноће и функције расподеле вероватноће излазне снаге у зависности од дела унутарћелијских веза,
- поступак за утврђивање зависности средње снаге, густине вероватноће и функције расподеле вероватноће излазне снаге у зависности од односа броја корисника и броја саобраћајних канала и
- развој поступака симулације за проверу познатих средњих вредности и расподела снаге у GSM ћелији.

Посебан допринос представља и оригинални софтвер за симулацију модела базне станице и процену излазне снаге који се заснива на *Monte Carlo* методу. Структура симулационог софтвера се може разложити на симулационе моделе за процену вредности излазне снаге сложених модела GSM ћелије као што су: ћелија

с великим уделом унутарћелијског саобраћаја, ћелија с великим утицајем ограниченог броја извора саобраћаја, ћелија с сложеном зависношћу расподеле густине корисника и ћелија са сложеном зависношћу слабљења сигнала. На основу развијених модела, могуће је проценити ефикасност појединих метода за уштеду енергије у GSM мрежи, као и дефинисање стратегија за увођење нових мера уштеде. Значај истраживања је стога изражен кроз нова сазнања о могућностима уштеде енергије у мобилним мрежама.

Као што је већ напоменуто, у општем случају статистичке особине излазне снаге базне станице представљају здружену статистичку расподелу више независних случајних величина. Познавање расподеле излазне снаге базне станице неопходан је услов за оптималну динамичку контролу снаге, што подразумева максимизација спектралне ефикасности уз минималну потрошњу енергије у условима задржавања захтеваног квалитета сервиса. С обзиром на чињеницу да су базне станице предимензионисане у погледу потрошње енергије због краткотрајних оптерећења саобраћаја (енергетска редунданса), подешавање базних станица (укључивање и искључивање) у зависности од динамике саобраћајног оптерећења, густине горисника и утицаја унутарћелијских веза ствара предуслове за значајну уштеду енергије. Намеће се јасан закључак да се **познавањем статистичке расподеле снаге базне станице могу дефинисати ефикасне стратегије за уштеду енергије засноване на адаптацији режима рада GSM базне станице или GSM мреже.**

На основу резултата који су добијени током израде дисертације, могуће је отворити више тема које би могле бити предмет даљих истраживања. Наиме, даља истраживања биће усмерена на усавршавању симулационог поступка са акцентом на моделирање параметара простирања и одређивања њиховог утицаја на расподелу излазне снаге базне станице. Такође, идеја је да се у симулациони модел укључи GPRS и UMTS технологија. Тиме би се покрила скоро целокупна телекомуникациона инфраструктура која је тренутно у експлоатацији. Налажење нових аналитичких модела и њихова верификација симулацијом, може бити предмет даљих истраживања. Такође, предложени аналитичко-симулациони модели би могли да буду разматрани и за друге намене у управљању ресурсима мобилне мреже.

# **Литература**

- [1] Z. Niu: “Globally Resource-Optimized and Energy-Efficient Networks (“GREEN”)”, *Asia Communications and Photonics Conference and Exhibition*, 2009.
- [2] Y. Chen et al.: “Fundamental Tradeoffs on Green Wireless Networks”, *IEEE Communications Magazine*, volume 49, issue 6, 2011.
- [3] Z. Niu: “TANGO: Traffic-Aware Network planning and Green Operation”, *Green Touch open forum*, 2011.
- [4] E. Oh, B. Krishnamachari, X. Liu, Z. Niu: “Toward dynamic energy-efficient operation of cellular network infrastructure”, *IEEE Communications Magazine* 49(6): 56-61, 2011.
- [5] F. Richter, A. J. Fehske, G. Fettweis: “Energy Efficiency Aspects of Base Station Deployment Strategies for Cellular Networks”, *Vehicular Technology Conference*, USA, Fall 2009.
- [6] K. Dufková, M. Popović, K. Ramin, J. Y. Le Boudec, M. Bjelica, L. Kencl: “Energy Consumption Comparison Between Macro-Micro and Public Femto Deployment in a Plausible LTE Network”, *Proc. 2nd International Conference on Energy-Efficient Computing and Networking (E-energy 2011)*, pp. 67-76, New York, NY, USA, 2011.
- [7] O. Blume, H. Eckhardt, S. Klein, E. Kühn, W. M. Wajda: “Energy savings in mobile networks based on adaptation to traffic statistics”, *Bell Labs Technical Journal* 15(2): 77-94, 2010.
- [8] K. Dufková, M. Bjelica, B. Moon, L. Kencl, J. Y. Le Boudec: “Energy Savings for Cellular Network with Evaluation of Impact on Data Traffic Performance”, *European Wireless 2010*, Lucca, Italy, April 12-15, 2010.

- [9] M. A. Marsan, M. Meo : „Green Wireless Networking: Three Questions“, Radio Commun. Systems Lab., KTH, Sweden, Oct. 1994 (Submitted to Wireless Personal Communications).
- [10] [http://www.privateline.com/PCS/GSM/BS\\_24x\\_Brochure.pdf](http://www.privateline.com/PCS/GSM/BS_24x_Brochure.pdf)
- [11] [http://www.umtsworld.com/technology/ran/NEC\\_nodeb.htm](http://www.umtsworld.com/technology/ran/NEC_nodeb.htm)
- [12] A. Fehske, J. Malmudin, G. Biczok et al. : “The Global Carbon Footprint of Mobile Communications: The Ecological and Economic Perspective”, *IEEE Communications Magazine* 49, 2011.
- [13] G. Fettweis, E. Zimmermann: “ICT energy consumption-trends and challenges”, *Proceedings of the 11th international symposium on Wireless Personal Multimedia Communications*, 2008.
- [14] T. Kelly: “ICTs and climate change”, *ITU-T Technology Watch Report #3*, 2007.
- [15] H. Karl: “An overview of energy efficient techniques for mobile communication systems”, *Technische University Berlin, Tech. Rep., TKN-03-XXX*, 2003.
- [16] S. McLaughlin: “Green radio: the key issues— programme objectives and overview“, *Wireless World Research Forum*, 2008.
- [17] F. Williams: “Green wireless communications“, *eMobility, Tech. Rep*, 2008.
- [18] J. Malmudin et al. : “Greenhouse Gas Emissions and Operational Electricity Use in ICT and Entertainment & media Sectors“, *Journal of Industrial Ecology, volume 14, issue 5*, 2010.

- [19] D. Lister: „An operator’s view on green radio“, *Keynote Speech, GreenComm*, 2009.
- [20] Z. Niu, Y. Wu, J. Gong, Z. Yang: „Cell zooming for cost-efficient green cellular networks“, *IEEE Communication Magazine* 48(11):74–79, 2010.
- [21] Mobile Europe-Green base station - the benefits of going green, <http://www.mobileeurope.co.uk/news/features/7603-7641>, 2008.
- [22] T. Haynes: „Designing energy-smart 3G base stations“, *RF design magazine*, 2007.
- [23] V. Chandrasekhar, J. G. Andrews: „Femtocell Networks: a survey“, *IEEE Communication Magazine* 46(9):59–67, 2008.
- [24] N. Vallina-Rodriguez, P. Hui, J. Crowcroft, A. Rice: „Exhausting battery statistics, understanding the energy demands on mobile handsets“, *Proceedings of ACM MobiHeld*, 2010.
- [25] A. Rahmati, L. Zhong: „Context-for-wireless: contextsensitive energy-efficient wireless data transfer“, *Proceedings of ACM MobiSys*, 2007.
- [26] CISCO: „Cisco visual networking index: global mobile data traffic forecast update, 2010—2015“, Tech. Rep, 2010.
- [27] D. Čabrić, S. Mubaraq Mishra, D. Willkomm et al.: “A Cognitive Radio Approach for Usage of Virtual Unlicensed Spectrum”, *In Proceedings of 14<sup>th</sup> IST Mobile Communication Summit*, 2005.
- [28] M. Rahman, *Overview of energy saving aspects in 2G and 3G Mobile Communication Networks*, Master Thesis, University of Gävle, Stockholm, 2009.

- [29] X. Wang et al. : “A Survey of Green Mobile Networks: Opportunities and Challenges”, *Journal Mobile Networks and Applications*, volume 17, issue 1, February 2012.
- [30] G. Auer et al.: “Enablers for Energy Efficient Wireless Networks”, *Vehicular Technology Conference*, September 2010.
- [31] ETSI TS102 706, 2011.
- [32] OPERA-Net Project, <http://www.celtic-initiative.org/Projects/OPERA-Net>.
- [33] GREEN-T Project, <http://www.celtic-initiative.org/Projects/Celticprojects/Call8/GREEN-T/green-t-default.asp>.
- [34] Green IT Initiatives in Japan, METI, Japan, October 2008, <http://www.meti.go.jp/english/policy/GreenITInitiativeInJapan.pdf> .
- [35] T. Fujii, M. Sakamoto: „Reduction of Cochannel Interference in Cellular Systems by Intra-zone Channel Reassignment and Adaptive Transmitter Power Control“, *Proc.IEEE Veh. Tech. Conf., VTC-88*, 1988, pp. 668-672.
- [36] T. Nagatsu, T. Tsuruhara, M. Sakamoto: „Transmitter Power Control for Cellular Land Mobile Radio“, *IEEE Proc. Globecom '83*, pp. 1430-1434.
- [37] J. Zander: „Performance of optimum transmitter power control in cellular radio Systems“, *IEEE trans. on Veh. Technology*, vol.41, no. 1 Feb 1992, pp 57 -62.
- [38] J. C. M. Restrepo, C. G. Gruber, C. M. Machuca : „Energy Profile Aware Routing“, *Communications Workshops*, 2009.
- [39] J. Lorincz, T. Garma, G. Petrović: „Measurements and Modelling of Base Station Power Consumption under Real Traffic Loads, Sensors“, vol. 12, no. 4,p. 4281-4310, 2012.



- [40] A. Corliano, M. Hufschmid, Energieverbrauch der mobilen Kommunikation — Schlussbericht, Tech. Rep. 280030, Bundesamt für Energie, Bern, Switzerland, in German (2008).
- [41] C. Forster, I. Dickie, G. Maile, H. Smith, M. Crisp : „Understanding the Environmental Impact of Communication Systems“, Final Report, Eftec-Plextek, 2009.
- [42] T. Toftegaard, J. Wigard: „Performance Enhancements in a Frequency Hopping GSM Network“, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [43] N. Nešković, A. Nešković, M. Koprivica, Đ. Paunović: „Eksperimentalno-statistička analiza nivoa elektromagnetne emisije u lokalnoj zoni antenskih stubova baznih stanica mobilne telefonije“, Telekomunikacije, četvrti broj, 2009.
- [44] Закон о заштити од нејонизујућег зрачења, “Сл. гласник РС”, бр. 36/09, 2009.
- [45] Правилник о границама излагања нејонизујућим зрачењима, “Сл. гласник РС”, бр. 36/09, 2009.
- [46] N. Bambos, S. C. Chen, G. J. Pottie: „Channel Access Algorithms with Active Link Protection for Wireless Communication Networks with Power Control“, Technical Report, UCLA-ENG-95-114, Department of Electrical Engineering, UCLA, 1995.
- [47] M. Andersin, Z. Rosberg, J. Zander: „Distributed Discrete Power Control in Cellular PCS“, *TRITA-IT R 94-23, ISSN 1103-534X, ISRN KTH/IT/R-94/23-SE*, Radio Commun. Systems Lab., KTH, Sweden, Oct. 1994 (Submitted to Wireless Personal Communications).
- [48] G. Heine: „GSM Networks: Protocols, Terminology and Implementation“, Artech House, 1999.

- [49] J. Eberspracher, H. J. Vögel and C. Bettstetter: *GSM, Switching, Services and Protocols*, John Wiley & Sons, 1999.
- [50] G. Sanders, L. Thorens, M. Reisky, O. Rulik, S. Deylitz: *GPRS Networks*, John Wiley & Sons, 2003.
- [51] S. M. Ross, *Introduction to Probability Models*, Elsevier, 2007.
- [52] M. Canales, Á. Hernández, A. Valdovinos: “Trunking capacity estimation for wide area multicell private mobile radio networks”, *Archiv für Elektronik und Übertragungstechnik*, (AEÜ), vol. 64, no 1, pp. 8-16, 2010.
- [53] A. Anand, V. Pejović, E. M. Belding and D. L. Johnson: “VillageCell: Cost Effective Cellular Connectivity in Rural Areas”, *Proceedings of the 5th International Conference on Information and Communication Technologies and Development*, Atlanta, 2012.
- [54] M. Tolstrup: *Indoor Radio Planning – a Practical Guide for GSM, DCS, UMTS and HSPA*, John Wiley and Sons, 2008.
- [55] V. B. Iversen: *Teletraffic Engineering and Network Planning*, Technical University of Denmark, 2007.
- [56] D.J. Sutton: „The Application of Reversible Markov Population Processes to Teletraffic“, *A.T.R.* Vol. 13: 2, 3–8, 1980.
- [57] A. M. Law: *Simulation Modeling & Analysis*, McGraw-Hill, 2007.
- [58] H. Akimaru, K. Kawashima: *Teletraffic, Theory and Applications*, Springer, 1992.

- [59] M. C. Jeruchim, P. Balaban, K. Sam Shanmugan: *Simulation of Communication Systems: Modeling, Methodology, and Techniques*, Second Edition, Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [60] M. Matsumoto, T. Nishimura: "Mersenne twister: a 623-dimensionally equidistributed uniform pseudo-random number generator", *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation* 8 (1): 3–30, 1998.
- [61] J. Durbin, G. S. Watson: "Testing for serial correlation in least squares regression. III". *Biometrika* 58 (1): 1–19, 1971.
- [62] M. Bjelica: *Modeliranje i Simulacija u Telekomunikacijama*, Udžbenik, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2013.
- [63] T. J. Schriber, *An Introduction to Simulation using GPSS/H*, Second Edition, Wiley, 1991.
- [64] *ns-2 simulator*, <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [65] *ns-3 Tutorial*, Release ns-3-dev, ns-3 project, December 2011.
- [66] Using the Georgia Tech Network Simulator,  
[http://www.ece.gatech.edu/research/labs/MANIACS/GTNetS/docs/GTNetS\\_manual.pdf](http://www.ece.gatech.edu/research/labs/MANIACS/GTNetS/docs/GTNetS_manual.pdf).
- [67] *SSFNet*, <http://www.ssfnet.org>
- [68] *OPNET*, <http://www.opnet.com/>
- [69] *NetSim*, <http://tetcos.com/>
- [70] *OMNeT++*, <http://www.omnetpp.org>

- [71] O. Arnold, F. Richter, G. Fetweiss, O. Blume: „Power Consumption Modeling of Different Base Station Types in Heterogenous Cellular Networks“, Future Network and Mobile Summit Conference Proceedings, 2010.
- [72] J.F.C. Kingman, „Poisson Processes“, Oxford University Press, 2002.
- [73] P. Traynor, W. Enck, P. McDaniel, T. LaPorta: „Mitigating Attacks on Open Functionality in SMS-Capable Cellular Networks“, Oxford University Press, 2002.
- [74] D. Colombi, B. Thors, T. Persson, N. Wiren, L.E. Larsson, C. Törnevik: „Output power distributions of mobile base stations based on network measurements“, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2013.
- [75] W. Wujun: „Green BTS gives fresh breath“, Huawei, 2008.
- [76] P. Jovanović, M. Mileusnić, A. Lebl, D. Mitić, Ž. Markov: „Calculation of the Mean Output Power of Base Transceiver Station in GSM“, Automatika Journal, ISSN 1848-3380, 2013.
- [77] A. Papoulis: Probability, Random Variables, and Stochastic Processes“, McGraw-Hill, 1991.
- [78] R.M. Corless, G.H. Gonnet, D.E.G. Hare, D.J. Jeffrey, D.E. Knuth : „On the Lambert W Function“, Advances in Computational Mathematics, Vol.5, pp.329-359, 1996.
- [79] P. Jovanović, T. Šuh, A. Lebl, D. Mitić, Ž. Markov: „Influence of Intra-cell Connections on the Traffic Calculations of Radio Resources in Mobile Network“, Frequenz, Vol. 67, Issue 9-10, 2013.
- [80] R. Brent : „Uniform random number generators for supercomputers“, Proc. of Fifth Australian Supercomputer Conference, pp. 704-706, Melbourne, Dec. 1992.

- 
- [81] X. Tian, K. Benkrid: „Mersenne Twister Random Number Generation on FPGA, CPU and GPU“, NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems, 2009.
- [82] Traffic and Data Market Report, Ericsson, 2011.
- [83] E.M.M. Winands, J. Wieland, B. Sanders: „Dynamic Half-rate Connections in GSM“, *Archiv für Elektronik und Übertragungstechnik*, (AEÜ), Vol. 60, pp. 504–512, 2006.
- [84] J.O. Irwin: „On the Frequency Distribution of the Means of Samples from a Population Having any Law of Frequency with Finite Moments, with Special Reference to Pearson's Type II“, *Biometrika*, Vol. 19, No. 3/4, pp. 225–239, 1927.
- [85] P. Hall: „The Distribution of Means for Samples of Size N Drawn from a Population in which the Variate Takes Values Between 0 and 1, All Such Values Being Equally Probable“, *Biometrika*, Vol. 19, No. 3/4., pp. 240–245, 1927.
- [86] P. Jovanović, M. Bjelica: „Estimation of GSM Base Station Output Power Cumulative Density Function“, *Archiv für Elektronik und Übertragungstechnik*, (AEÜ), ISSN 1434-8411, 2014.

## Биографија кандидата

Предраг Јовановић је рођен 16. марта 1985. године у Чачку. Основну школу и гимназију похађао је у Инђији. Уписао је Електротехнички факултет у Београду 2003. године, на Одсеку за телекомуникације и информационе технологије. Дипломирао је 2007. године, одбранивши дипломски рад под насловом „Широкопојасни балансни појачавач 800-1200 MHz“. Дипломске академске (мастер) студије завршио је на Електротехничком факултету у Београду, на Одсеку за телекомуникације – Модул микроталасна техника, одбранивши мастер тезу под насловом „Напонски контролисан осцилатор на 12 GHz” 2008. године. Докторске студије на Електротехничком факултету у Београду уписао је 2008. године, на Модулу микроталасна техника.

Од средине 2008. до средине 2009. године, био је запослен у Институту ИМТЕЛ на развоју активних компоненти на високим учестаностима. Од 2010. године је запослен у Институту за телекомуникације и електронику (ИРИТЕЛ) у Београду, на месту старијег сарадника у сектору за радио комуникације. Ангажован је на развоју и реализацији софтверско-хардверских решења из области радио комуникација и софтверски дефинисаног радија. У оквиру истраживања у склопу докторске дисертације, 2012. и 2013. године ради на развоју симулационог софтвера за анализу расподеле излазне снаге базних станица у мобилној мрежи.

Коаутор је два објављена рада и два рада прихваћена за објављивање у часописима са SCI листе. Поред тога, Предраг Јовановић је објавио 4 рада на међународним конференцијама, 1 рад у водећем часопису од националног значаја и 3 рада у изводу у оквиру округлих столова. Коаутор је и 5 техничких решења у оквиру пројекта TP32051 из области софтверски дефинисаног радија, суфинансираног од Министарства просвете, науке и технолошког развоја републике Србије (циклус истраживања 2011-2014).

# Прилози

Прилог 1.

## Изјава о ауторству

Потписани-а ПРЕДРАГ Н. ЈОВАНОВИЋ  
број уписа 5046/08

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

СИМУЛАЦИОНИ МОДЕЛ ЗА ПРОЦЕНУ ИЗЛАЗНЕ  
СНАГЕ GSM БАЗНЕ СТАНИЦЕ

- резултат сопственог истраживачког рада,
- да предложена дисертација у целини ни у деловима није била предложена за добијање било које дипломе према студијским програмима других високошколских установа,
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио интелектуалну својину других лица.

Потпис докторанда

У Београду, 26.5.2014

Предраг Јовановић



Прилог 2.

**Изјава о истоветности штампане и електронске  
верзије докторског рада**

Име и презиме аутора ПРЕДРАГ Н. ЈОВАНОВИЋ  
Број уписа 5046/08  
Студијски програм МИКРОТАМНА ТЕХНИКА  
Наслов рада СИМУЛАЦИОНИ МОДЕЛ ЗА ПРОЦЕНУ ИЗЛАЗНЕ СНАГЕ GSM БАЗНЕ СТАНИЦЕ  
Ментор МИЛАН БЈЕЛИЦА

Потписани ПРЕДРАГ Н. ЈОВАНОВИЋ

изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла за објављивање на порталу **Дигиталног репозиторијума Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског звања 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.

Потпис докторанда

У Београду, 26.5.2014

Предраг Јовановић

Прилог 3.

### Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

СИМУЛАЦИОНИ МОДЕЛ ЗА ПРОЦЕНУ ИЗЛАЗНЕ  
СНАГЕ GSM БАЗНЕ СТАНИЦЕ

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство
2. Ауторство - некомерцијално
3. Ауторство – некомерцијално – без прераде
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима
5. Ауторство – без прераде
6. Ауторство – делити под истим условима

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци, кратак опис лиценци дат је на полеђини листа).

У Београду, 26.5.2014

Потпис докторанда

Илија Илић