

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД  
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

На правах рукопису

**ВОРОПАЄВА АННА ОЛЕКСАНДРІВНА**

УДК 621.391

**МЕТОДИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ БЕЗПРОВОДОВИМИ  
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИМИ МЕРЕЖАМИ НОВОГО ПОКОЛІННЯ**

05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

**Дисертація на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук**

Науковий керівник –  
кандидат технічних наук, професор  
Турупалов В.В.

Донецьк – 2014

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ .....	4
ВСТУП .....	6
1 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ БЕЗПРОВОДОВИМИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИМИ МЕРЕЖАМИ .....	13
1.1 Аналіз проблематики розвитку безпроводових мережі в Україні .....	13
1.2 Концепції розвитку безпроводових телекомунікаційних мереж нового покоління .....	15
1.3 Особливості впровадження безпроводових мереж нового покоління.....	17
1.4 Аналіз існуючих методів оптимізації безпроводових мереж другого покоління .....	21
1.5 Аналіз методів оптимізації безпроводових мереж третього покоління.....	23
1.6 Вибір і обґрунтування показника для оцінки задоволеності користувача.....	25
1.7 Висновки.....	29
2 МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОЇ МЕРЕЖІ ЯК ДИСКРЕТНО- БЕЗПЕРЕРВНОЇ СИСТЕМИ.....	30
2.1 Розробка аналітичної моделі безпроводової телекомунікаційної мережі як дискретно-безперервної системи.....	31
2.2 Дослідження динаміки розробленої моделі з використанням графа синхронізації.....	33
2.3 Розробка методу визначення керованості дискретно-безперервної системи .....	49
2.4 Висновки.....	54
3 РОЗРОБКА МЕТОДІВ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ БЕЗПРОВОДОВИМИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИМИ МЕРЕЖАМИ НОВОГО ПОКОЛІННЯ .....	56
3.1 Визначення двосторонніх функцій корисності.....	56
3.2 Розробка методу управління швидкістю пари користувачів	61

безпроводової телекомунікаційної мережі.....	
3.3 Розробка методу оптимального управління безпроводовою телекомунікаційною мережею .....	65
3.4 Розробка методу оптимального управління для стохастичних інформаційних потоків .....	74
3.5 Висновки.....	84
4 ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ РОЗРОБЛЕНИХ МЕТОДІВ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ БЕЗПРОВОДОВИМИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИМИ МЕРЕЖАМИ НОВОГО ПОКОЛІННЯ.....	86
4.1 Розробка структури системи управління безпроводовою телекомунікаційною мережею .....	86
4.2 Реалізація методу оптимального управління мережею на рівні користувача.....	95
4.3 Дослідження впливу коефіцієнту заміщення на функцію корисності .....	102
4.5 Дослідження роботи методу оптимального управління для стохастичних інформаційних потоків.....	105
4.6 Висновки.....	109
ВИСНОВКИ.....	111
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	113
ДОДАТОК А Текст програми визначення керованості стану безпроводової системи.....	126
ДОДАТОК Б – Результати моделювання.....	128
ДОДАТОК В – Графічні результати моделювання.....	139
ДОДАТОК Г Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.....	140

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ДБС –	Дискретно-безперервна система
ЗК -	Задоволеність користувача
КЗ –	Коефіцієнт заміщення
КФК –	Функція корисності на рівні користувача
НСД -	Найбільший спільний дільник
НСК -	Найменше спільне кратне
СК -	Система управління
СФК –	Функція корисності на рівні сеансу
ФК –	Функція корисності
ФКА –	Функція корисності абонента
ФКМ –	Функція корисності мережі
BSC –	Base Station Controller
BTS –	Base Transceiver Station
CDMA –	Code Division Multiple Access
DCN –	Data Communication Network
EDGE –	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
FEC –	Forward Error Correction
GERAN –	GPRS/EDGE Radio Access Network
GPRS –	General Packet Radio Service
G-MSC –	Gateway Mobile Switching Centre
GSM –	Global System for Mobile Communications
GGSN –	GPRS Gateway Service Node
HSPA –	High Speed Packet Access
LLA –	Logical Layered Architecture
LTE –	Long Term Evolution
MGW –	Media Gateway
MIMO –	Multiple Input Multiple Output
MME –	Mobility Management Entity

MSS – Mobile Switching Centre Server  
NUM – Network Utility Maximization  
OFDMA – Orthogonal Frequency Multiple Access  
QAM – Quadrature Amplitude Modulation  
QPSK – Quadrature Phase Shift Keying  
SGSN – Serving GPRS Support Node  
SGW – Serving Gateway  
TMN – Telecommunication Management Network  
UMTS – Universal Mobile Telecommunications System  
UTRAN – UMTS Terrestrial Radio Access Network

## ВСТУП

*Актуальність теми.* В сучасних умовах стрімкого розвитку телекомунікацій через появу великої кількості мобільних гаджетів (ноутбуки, планшети, смартфони) все більших масштабів набувають безпроводові мережі. Зі зростанням долі трафіку від мультимедійних послуг (відео за запитом, відеовиклики, online ігри, звернення до соціальних мереж та користування відповідним контентом) актуальним стає питання підтримки гарантованої якості обслуговування таких сервісів.

Варто відмітити, що розвиток безпроводового зв'язку супроводжується безперервною зміною технологій, в основі яких лежать стандарти стільникового зв'язку GSM і CDMA, а також стандарти системи передачі даних IEEE 802. Відомо, що раніше технології безпроводового зв'язку розвивалися за двома практично незалежними напрямками – системи стільникового зв'язку з комутацією каналів (основну частку трафіку складали сервіси голосових викликів) та безпроводові системи передачі даних з пакетною комутацією (Wi-Fi, WiMax). Але, останнім часом спостерігається явна тенденція до злиття цих напрямків. Обсяг пакетних даних у мережах мобільного зв'язку третього покоління (3G) вже перевищує обсяг голосового трафіку, що пов'язано з впровадженням технологій HSPA [86].

В свою чергу, сучасні мережі передачі інформації забезпечують відповідний рівень якості послуг (QoS), гарантований абонентам для різних типів трафіку. Реалізується підтримка пріоритезації окремих потоків інформації, при чому як на мережевому/транспортному рівнях (TCP/IP) так і на MAC-рівні (стандарти IEEE 802.16). Саме це і дозволяє використовувати їх для надання послуг голосового зв'язку, передачі мультимедійної інформації та ін.

У зв'язку з цим можна вважати актуальним питання дослідження мереж наступного покоління (4G), яке нерозривно пов'язане зі створенням універсальних конвергентних мобільних мереж передачі інформації, що підтримують відповідний рівень QoS. Прикладом таких мереж можна назвати розроблену проектом 3GPP мережу радіодоступу E-UTRAN та архітектуру базової мережі високого рівня SAE концепції Long term evolution (LTE).

При великій кількості операторів мобільного зв'язку та при практичній ідентичності сервісів, які вони надають своїм абонентам, суттєво зростає рівень конкуренції. Відомо, що в Україні кількість користувачів мобільного зв'язку перевищує кількість населення [34], тобто кожний абонент потенційно є користувачем кількох стільникових операторів. В найближчій перспективі згідно рішення Національної комісії з регулювання в сфері зв'язку та інформатизації №248 від 25.04.2013 планується забезпечити надання єдиного номеру абонентам мереж рухомого зв'язку при користуванні послугами різних операторів.

Це спричинює необхідність переносити акценти при побудові стратегії діяльності оператора мережі мобільного зв'язку з техніко-економічних показників на підтримання лояльності старих та залучення нових абонентів. В цих умовах все важливішим стає забезпечення високого рівня задоволеності користувачем послугою, яку він отримує від оператора безпроводового зв'язку. Зрозуміло, що абонент бажає мати більш високий рівень обслуговування (особливо швидкість передачі при сервісах, чутливих до зміни такого параметру) за меншу плату. Відповідно, зі своєї сторони оператор прагне виділити гарантовану пропускну спроможність, не перевищуючи при цьому ресурси мережі.

Традиційні підходи до забезпечення якості обслуговування базуються на обробці пакетів потоків трафіку згідно рівня їх пріоритету, що встановлюється у відповідності до стандартних рекомендацій щодо пріоритезації послуг. Існуючі рекомендації стосовно пріоритезації послуг у

телекомунікаційних мережах не мають чіткого математичного обґрунтування та не можуть адекватно відображати необхідний рівень пріоритету для тієї та іншої послуги.

В останній час проводяться активні дослідження, спрямовані на реалізацію можливості забезпечення гарантованих параметрів якості в безпроводових мережах нового покоління, зокрема LTE, в умовах жорсткої конкуренції на ринку зв'язку. Такими актуальними проблемами, а також дослідженням задоволеності користувачів отриманими послугами займаються іноземні та вітчизняні автори: C.-S. Chang [77], S.H. Low [95], F. Kelly [89, 90], M. Chiang [84], Cassandras C. G. [76], D.E. Lapsley [96], P. Hande [84], S. Zhang [110], Olsder G. J. [101], S. Rangan [84], J.W. Lee [93, 94], Гилка У.Л. [22, 23], Безрук В.М. [66], Чеботарева Д.В. [66], Бекрман Л.Н. [39], Поповський В.В. [51], Турупалов В.В. [10, 63], Климаш М.М. [35, 36], Тихвинский В.В. [57-62], Хімчак В.І. [66], Маслов В.П. [46], Новіков П.А [49] та ін.

Незважаючи на велику кількість наукових робіт та публікацій, присвячених оптимальному управлінню безпроводовими мережами нового покоління, з метою підвищення ефективності роботи мережі виникає необхідність розробки нових методів управління, які будуть враховувати рівень задоволеності користувача телекомунікаційною послугою. Більшість існуючих методів оптимального управління ресурсами безпроводових телекомунікаційних мереж, що ґрунтуються на оцінці задоволеності користувачів отриманими послугами, засновуються на інформації тільки про швидкість передачі і орієнтуються лише на односторонню функцію корисності. Запропонований метод оптимального управління безпроводовими мережами нового покоління базується на загальній задоволеності абонентів і спрямований на підвищення ефективності роботи мережі на основі двосторонньої функції корисності абонента при обмеженнях на пропускну спроможність операторів зв'язку. Зважаючи на все вищесказане, можна вважати дане питання важливим та актуальним.



### ***Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами***

Питання та задачі, котрі розглянуті в дисертаційній роботі, відповідають Державній програмі розвитку «Про основні наукові напрями та найважливіші проблеми фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних і гуманітарних наук на 2009-2013 рр.» позиція 1.2.5.2 «Науково-технічне забезпечення процесів конвергенції в телекомунікаціях» та 1.2.5.4. «Розвиток стільникових систем широкосмугового радіо доступу», котра затверджена наказом МОН України, Національною Академією Наук України від 26.11.09 № 1066/609. Виконання дисертаційної роботи пов'язане з планами науково-дослідницьких робіт Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет». Ряд положень дисертаційної роботи є результатом науково-дослідницьких робіт, виконаних при безпосередній участі автора в якості виконавця:

– «Розробка теорії синтезу дискретно-безперервних систем автоматичного управління технологічними об'єктами» (ДР № 0111U001424, 2011-2013 рр.);

– «Дослідження та розробка методів проектування та підвищення технічної ефективності цифрових систем управління, інформаційно-вимірювальних систем та телекомунікацій» (Н-03-11, 2011-2015 рр.);

Окремі результати дослідження прийняті до впровадження при переході до стандартів 4G ПрАТ «МТС-Україна», що підтверджено відповідними документами.

Результати дисертаційного дослідження використані в учбовому процесі ДВНЗ Донецького національного технічного університету при побудові лекційних курсів та лабораторних робіт дисциплін «Мобільні мережі», «Основи теорії систем та мереж зв'язку».

***Метою роботи*** є удосконалення управління безпроводовою телекомунікаційною мережею на основі застосування методів оптимального управління.

Для досягнення мети необхідно вирішити загальну науково-прикладну задачу розробки методів оптимального управління безпроводовою телекомунікаційною мережею нового покоління.

В свою чергу, для рішення загальної науково-прикладної задачі дисертаційного дослідження необхідним стає вирішення наступних *задач*:

- провести аналіз розвитку безпроводових телекомунікаційних мереж нового покоління;
- вдосконалити метод визначення керованості стану безпроводової мережі нового покоління як дискретно-безперервної системи;
- розробити двосторонню цільову функцію корисності безпроводової телекомунікаційної мережі для різних типів сервісів;
- розробити методи оптимального управління ресурсами безпроводової телекомунікаційної мережі нового покоління;
- розробити структуру системи управління для підвищення ефективності функціонування безпроводової телекомунікаційної мережі на основі запропонованих методів оптимального управління;
- розробити програмно-апаратний комплекс для реалізації запропонованих методів.

**Наукова новизна** полягає в розробці методів управління безпроводовими телекомунікаційними мережами нового покоління та полягає в наступному:

- удосконалено метод визначення керованості стану дискретно-безперервної системи, який, на відміну від відомих, дозволяє за рахунок інформації про стан мережі LTE шляхом знаходження послідовності керуючих впливів визначити керованість стану мережі;
- вперше розроблена двостороння цільова функція корисності безпроводової телекомунікаційної мережі, яка враховує співвідношення сеансів дуплексного режиму обміну даними та дозволяє здійснити оптимальний перерозподіл ресурсів мережі;

– вперше розроблено метод управління ресурсами безпроводової телекомунікаційної мережі нового покоління, котрий, на відміну від відомих, базується на запропонованій двосторонній функції корисності мережі, враховує вартість використання ресурсів і забезпечує оптимальний режим роботи мережі;

– вперше розроблено метод регулювання швидкості передачі, який, на відміну від відомих, враховує задоволеність абонента послугою, що йому надається, та підвищує ефективність розподілу ресурсів.

**Об’єкт дослідження:** процеси функціонування безпроводових телекомунікаційних мереж нового покоління.

**Предмет дослідження:** методи оптимального управління безпроводовими телекомунікаційними мережами нового покоління.

**Методи дослідження:** методи дослідження операцій, методи ідемпотентних алгебр, методи математичного моделювання.

**Практичне значення** отриманих в ході дисертаційного дослідження результатів для галузі телекомунікацій полягає в наступному:

– розроблена структура системи управління, котра на основі запропонованих методів оптимального управління підвищує ефективність функціонування безпроводової телекомунікаційної мережі нового покоління від 8 % до 21 % для різних типів сервісів;

– розроблено програмно-апаратний комплекс визначення керованості стану дискретно-безперервної системи та розрахунку оптимальної кількості ресурсних блоків базової станції безпроводової мережі нового покоління при зміні стану системи;

– окремі результати дослідження прийняті до впровадження при переході до стандартів 4G ПрАТ «МТС-Україна» (акт впровадження від 13.03.2014 р.)

#### ***Особистий внесок здобувача***

Полягає в самостійному отриманні основних наукових результатів, експериментальних досліджень та апробації результатів. У друкованих

працях, опублікованих як у співавторстві, так і одноосібно, відображено, що дисертантом самостійно сформовані завдання дослідження, розроблено метод визначення керованості стану дискретно-безперервної системи [9], розроблено двосторонню функцію корисності абонента [17], розроблено метод оптимального управління ресурсами телекомунікаційної мережі [33], визначено концепцію та структуру системи управління безпроводовими мережами нового покоління [16].

### ***Апробація результатів дисертації.***

Основні результати досліджень були представлені та обговорені на наступних науково-технічних конференціях:

–XVIII Міжнародна конференція з автоматичного управління «Автоматика–2011» м. Львів, Україна, 28-30 вересня 2011 р.;

–VIII Міжнародна молодіжна конференція «Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій РТ-2012» м.Севастополь, АР Крим, Україна, 23-27 квітня 2012р.;

–XIX Міжнародна конференція з автоматичного управління «Автоматика 2012» 26-28 вересня м. Київ, Україна, 2012р.;

–Науково-методична конференція «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2012» м. Львів, Україна, 1-3 листопада 2012р.

–Науково-методична конференція «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2012» м. Львів, Україна, 1-3 листопада 2012р.;

–VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології» м. Київ, Україна, 1-5 жовтня 2012р.;

–VI Міжнародний науково-технічний симпозіум «Новые технологии в телекоммуникациях» ГУИГТ-Карпаты, Україна 21-25 січня 2013р.

***Публікації.*** Матеріали дисертації опубліковані в 14 наукових працях, з них 7 – статті у фахових виданнях, згідно з переліком ДАК України, з них 1

публікація у збірнику, що індексується у міжнародній наукометричній базі Index Copernicus, 7 – тези доповідей на науково-технічних конференціях.

***Структура та обсяг дисертаційної роботи.*** Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг роботи становить 144 сторінки, у тому числі рисунок на двох сторінках, 4 додатки на 19 сторінках і список використаних джерел – 110 найменувань на 13 сторінках. Дисертація написана українською мовою.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бессараб В.І. Аналітична модель дискретно-безперервної системи з застосуванням апарату MAX-PLUS алгебри [Текст] / В.І. Бессараб А.О. Воропаєва // Всеукраїнський міжведомственный науково-технічний збірник «Автоматизированные системы управления и приборы автоматики». Выпуск 153. – Харьков, 2010. – 89 с., С. 33-39.
2. Бессараб В.І. Аналітична модель дискретно-безперервної системи з застосуванням апарату MAX-PLUS алгебри [Текст] / В.І. Бессараб А.О. Воропаєва // Всеукраїнський міжведомственный науково-технічний збірник «Автоматизированные системы управления и приборы автоматики». Выпуск 153. – Харьков, 2010. – 89 с., С. 33-39.
3. Бессараб В. І. Використання апарата «MAX-PLUS» алгебри для моделювання динаміки в інформаційних мережах із простою топологією [Текст] / В. І. Бессараб, Є.Г. Коваленко // Наукові праці Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова. Выпуск 44. – Київ, 2007. – С. 59 – 62.
4. Бессараб В.И. Выбор и обоснование критерия качества при синтезе оптимального управления в дискретно-непрерывных системах / В.И. Бессараб [Текст] // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. Выпуск (189). - Донецьк-2008. – 205 с., С. 13-19.
5. Бессараб В.И. Использование аппарата идемпотентных алгебр для анализа процессов в сети с предоставлением интегрированных услуг [Текст] / В.И. Бессараб, Э.Е. Зайцева, Е.Г. Коваленко // Системний аналіз та інформаційні технології. Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції. – К.:НТУ «КП», 2009. – С.460.
6. Бессараб В.І. Математичні основи теорії дискретно-безперервних систем: монографія / В.І. Бессараб. – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2011.

7. Вишнеvский В. М. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G / В.М. Вишнеvский, С. Л. Портной, И. В. Шахнович — М.: Техносфера, 2009.—472 с.
8. Воропаєва А.О. Аналітичні моделі для дослідження динамічних процесів в телекомунікаційних мережах [Текст] / А.О. Воропаєва // Дванадцята всеукраїнська (сьома міжнародна) студентська наукова конференція з прикладної математики та інформатики СНКПМІ – 2009: Тези доповідей. Львів: ЛНУ – 2009, С. 64-65
9. Воропаєва А.О. Апарат моделювання процесів в дискретно-безперервних системах [Текст] / А.О. Воропаєва, В.І. Бессараб, Е.Є. Зайцева // Матеріали 8-ої міжнародної молодіжної конференції Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій РТ-2012 – Севастополь-2012, С.124
10. Воропаєва А.О. Вибір критерію оптимізації бездротових динамічних мереж [Текст] / А.О. Воропаєва, В.В. Турупалов // Матеріали VIII міжнародної науково-технічної конференції „Сучасні інформаційно-комунікаційні технології” - Київ-2012, 205с., С.156-158
11. Воропаєва А.О. Використання функції корисності для оптимального розподілу ресурсів телекомунікаційних мереж [Текст] / А.О. Воропаєва // Матеріали VI Международного научно-технического симпозиума «Новые технологии в телекоммуникациях» ГУИГТ-Карпаты 2013 - Киев-2013, 160с., С.115-117
12. Воропаєва А.О. Застосування апарату ідемпотентних алгебр для рішення проблеми оптимального управління [Текст] / А.О. Воропаєва // Матеріали XIX Міжнародної конференції з автоматичного управління Автоматика 2012 // Київ-2012, 488 с., С. 351.
13. Воропаєва А.О. Ієрархічний підхід до організації управління в телекомунікаційних мережах [Текст] / А.О. Воропаєва // Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ-2010»: Матеріали 6-ої

- міжнар. молодіжної наук.-техн. конф., 19-24 квітня 2010 р. – Севастополь: Вид-во СевНТУ, 2010. – С.342
- 14.Воропаєва А.О. Критерії та методи оптимізації бездротових динамічних систем [Текст] / А. О. Воропаєва // Науковий вісник Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича. Серія: Комп'ютерні системи та компоненти. – Том 3, випуск 1. – Чернівці: ЧНУ, 2012. – 100 с., С.85
- 15.Воропаєва А.О. Методи оптимізації безпроводових мереж [Текст] / Воропаєва А.О // Науковий вісник Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича. Серія: Комп'ютерні системи та компоненти. –Чернівці: ЧНУ, 2013. Том 4, випуск 3. – С.106-113
- 16.Воропаєва А.О. Методи оптимізації каналного ресурсу в бездротових динамічних системах [Текст] / А. О. Воропаєва // Матеріали науково-методичної конференції „Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій - 2012” // Львів-2012, 138с., С. 63-67.
- 17.Воропаєва А.О. Оптимальне управління режимами прийому та передачі телекомунікаційних мереж [Текст] /А. О. Воропаєва // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. Випуск 1 (24) - Донецьк, ДонНТУ, 2013. С - 89-95.
- 18.Воропаєва А.А. Применение аппарата идемпотентной алгебры при исследовании телекоммуникационных сетей [Текст] / А.А. Воропаєва // Матеріали третьої Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми телекомунікацій», м. Київ, 21 – 24 квітня 2009 р. // Науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій»: Збірник тез. К.: НТУУ «КПІ», 2009. С. 113-114
- 19.Гельгор А.Л. Технология LTE мобильной передачи данных: учеб. пособие / Гельгор А.Л., Попов Е.А. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. — 204 с.



20. Гепко И.А. Современные беспроводные сети: состояние и перспективы развития / И.А. Гепко, В.Ф. Олейник, Ю.Д. Чайка, А.В. Бондаренко – К.: «ЕКМО», 2009. – 672 с.
21. Гилка У.Л. Аналіз ситуації та тенденцій на ринку телекомунікаційних послуг України [Текст] / У.Л. Гилка // «Економіка, менеджмент, бізнес» №1, 2010 – С. 92-99
22. Гилка У.Л. Конкуентоспроможність підприємств на ринку телекомунікаційних послуг [Текст] / У.Л. Гилка // Вісник ДУІКТ. Спеціальний випуск. – 2009. – С.40-45.
23. Гилка У.Л. Особливості конкуренції на ринку послуг телекомунікацій [Текст] / Гилка У.Л. // Наукові записки УНДІЗ, №3(11), 2009 – С. 95-103.
24. Груздев А. В. Некоторые аспекты развития систем сотовой связи 4го поколения [Текст] / А. В. Груздев, П. В. Мухин // Зв'язок.— 2009.— №4. - С. 23–29.
25. Груздев А. В. Некоторые аспекты развития систем сотовой связи 4го поколения / А. В. Груздев, П. В. Мухин // Зв'язок.— 2009.— №4. - С. 23–29. Груздев А. В. Некоторые аспекты развития систем сотовой связи 4го поколения / А. В. Груздев, П. В. Мухин // Зв'язок.— 2009.— №4. - С. 23–29.
26. Дюба В.В. Применение сетей Петри и инструмента идемпотентной алгебры для моделирования и оптимизации сети мобильной связи третьего поколения [Текст] / В.В. Дюба, А.А. Воропаева, В.И Бессараб // Автоматизація технологічних об'єктів та процесів. Пошук молодих / Збірник наукових праць XII науково-технічної конференції аспірантів та студентів в м. Донецьку 17–20 квітня 2012 р. – Донецьк, ДонНТУ, 2012. – С.29–32.
27. Егунов М.М. Системы управления сетями связи: Учебное пособие. /М.М. Егунов, О.Г. Шерстнева, Е.А. Абзапарова – Екатеринбург: УрТИСИ ГОУ ВПО «СибГУТИ», 2009. – 67 с.

28. Ермолаев В.Т. Теоретические основы обработки сигналов в системах мобильной радиосвязи / В.Т. Ермолаев, А.Г. Флакман – Нижний Новгород: НГУ им. И.Н. Лобачевского, 2010. – 107 с.
29. Жбанов С.А. Идемпотентный подход к линеаризации динамических процессов в телекоммуникационных системах [Текст] / С.А. Жбанов // Управление большими системами: Матер. VII Всерос. школы-конф. Т. 1. – Пермь, 2010.
30. Зайцева Е.Є. Алгоритм управління транспортною системою як дискретно-безперервним об'єктом [Текст] / Зайцева Е.Є., Бессараб В.І., Червинський В.В. // Наукові праці ДонНТУ. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. Вип. 21 (183) – Донецьк: ДонНТУ, 2011 – С. 19 – 25.
31. Зайцева Е.Є. Визначення досяжності та керованості в дискретно-безперервних системах [Текст] / Е.Є. Зайцева, В.І. Бессараб (к.т.н, доц.), А.О. Воропаєва // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. Випуск 22 (200). - Донецьк-2012. – 205 с., С. 17-23.
32. Закон України «Про телекомунікації» // Верховна Рада України; Закон від 18.11.2003 № 1280-IV. – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/cgi-bin/laws/main.cgi ?nreg=1280-15>.
33. Зорі А.А. Оптимізація розподілу ресурсів телекомунікаційної системи з урахуванням функції корисності [Текст] / А.А. Зорі, А.О. Воропаєва // Збірник наукових праць Донецького інституту залізничного транспорту Української державної академії залізничного транспорту – Випуск 32. – Донецьк 2012 – с.106-108.
34. Какой мобильной связью пользуются украинцы [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://techno.bigmir.net/technology/1531425-Какой-mobil-noj-svjaz-ju-pol-zujutsja-ukraincy--INFOGRAFIKA> - дата доступу 13.02.2014 р. – Загол. з екрану.

- 35.Климаш М.М. Дослідження показників якості надання послуг в інфокомунікаційних мережах [Текст] / М.М. Климаш // Збірник наукових праць «Інститут проблем моделювання в енергетиці». Випуск 24, - Київ, 2004 р.
- 36.Климаш М.М. Технології Мобільного зв'язку [Текст] / М.М. Климаш, В.О. Пелішок, П.М. Михайленич – Л., 2007 – 615 с.
- 37.Когда в украине реально может появиться LTE [Електронний ресурс] // Режим доступу: <http://www.broadband.org.ua/prensa/2282-kogda-v-ukraine-realno-mozhet-poyavitsya-lte> - дата доступу 13.03.2014 р. – Загол. з екрану.
- 38.Кривулин Н.К. Методы идемпотентной алгебры в задачах моделирования и анализа сложных систем / Н.К Кривулин – СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2009. – 256 с.
- 39.Кривуца В.Г. Інфокомунікаційні мережі нового покоління [Текст] / В.Г. Кривуца, Л.Н. Беркман, С.В. Толюпа – К.:ДУІКТ. – 2012 р. 286с.
- 40.Лемешко А.В. Динамическая модель структурно-функционального синтеза ТКС [Текст] / Лемешко А.В., Стерин В.Л. // - Электронное научное специализированное издание журнал «Проблемы телекоммуникаций» - 2011 – №3(5) – С. 8-17
- 41.Лемешко А.В. Результаты исследования модели управления трафиком с учётом задаваемых приоритетов для многопродуктового и многополюсного случаев [Электронный ресурс] / А.В. Лемешко, Ю.Н. Добрышкин, О.А. Дробот // Проблемы телекоммуникаций. – 2010. – № 2 (2). – С. 33 – 41. – Режим доступа к журн.: [http://pt.journal.kh.ua/2010/2/2/102\\_lemeshko\\_rezults.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2010/2/2/102_lemeshko_rezults.pdf).
42. Лещенко О.О. Застосування методів оптимізації в системах управління сучасними телекомунікаційними мережами [Текст] / О. О. Лещенко, Т. В. Майсак // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку . - 2013. - № 4. - С. 37-45.
- 43.Лещенко О. О. Оптимальні методи управління інфокомунікаційними

- мережами [Текст] / О. О. Лещенко// Матеріали ІХ науково-методичної конференції ДУІКТ «Сучасні тенденції розвитку технологій в інфокомунікаціях та освіті». Київ, 22-23 листопада 2012. – С.150.
- 44.Литвинов Г. Универсальные алгоритмы и идемпотентная математика/ Г. Литвинов // Компьютерные инструменты в образовании. - СПб.: Изд-во ЦПО "Информатизация образования", 2000, №6, С.12-18.
- 45.Лунтовский А.О. Основы проектирования и оптимизации беспроводных сетей. [Текст] Монографія. / А.О. Лунтовский – К.: ДУІКТ, 2010. – 202 с.
- 46.Маслов В.П. Идемпотентный анализ и его применение в оптимальном управлении / В.П. Маслов, В.Н. Колокольцов - М.: Физматлит, 1994. 144 с.
- 47.Методы научных исследований в телекоммуникациях. Том 2 [Текст] Учебное пособие / под ред. В.В. Поповского.- Х: компания СМІТ, 2013. – 330с.
- 48.Мобильные сети третьего поколения. Учебное пособие. / Ю.М. Горностаев и др. – М., МЦИТИ, 1998.
- 49.Новиков П.А. Организация механизма качества обслуживания для эмуляции сети LTE [Текст] / П.А. Новиков // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева № 1(98), - 2013. С.: 75-82
- 50.Отрох С.І. Основні тенденції розвитку мереж доступу на базі радіо технологій [Текст] / С.І. Отрох, О.С. Стец, О.В. Жданенко // Вісник ДУІКТ. – 2012. – Т.10, №1. – Стор. 63
- 51.Поповский В.В. Математические основы управления и адаптации в телекоммуникационных системах / В.В. Поповский, В.Ф. Олейник — Х.: СМІТ, 2011. — 362 с.
- 52.Поповський В.В. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем [Текст] / За загал. ред. В.В. Поповського С.О. Сабурова, В.Ф. Олійник та ін.. — Харків : Компанія СМІТ, 2006

53. Петерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем / Петерсон Дж. – М.:Мир, 1984 – 264с.
54. Петерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем / Петерсон Дж. – М.:Мир, 1984 – 264с.
55. Сайко В. Г. Практичні аспекти впровадження сучасних радіотехнологій WiMAX та радіорелейних систем [Текст] / В. Г. Сайко, Ю. М. Літвінов // Актуальні питання регулювання у сфері телекомунікацій та користування радіочастотним ресурсом України: II наук.практ. конф., 11–13 черв.2008 р.: тези доп.— К.: Укрчастотнагляд, 2008.—С. 86.
56. Стеклов В.К. Проективання телекомунікаційних мереж [Текст] / В.К. Стеклов, Л.Н Беркман – К.: Техніка, 2002.
57. Тихвинский В.О. Использование сервисной платформы IMS в конвергентных сетях 3G/LTE и NGN для предоставления мультимедийных услуг [Текст] / В.О. Тихвинский // – Труды третьей международной конференции «Конвергенция телекоммуникационных сетей и услуг в России». – 2009 г.
58. Тихвинский В. О. Подвижная связь третьего поколения: экономика и качество услуг [Текст] / В. О. Тихвинский, Е. Е. Володина.— М.: Радио и связь, 2005.
59. Тихвинский В.О. Сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура [Текст] / В.О. Тихвинский, С.В. Терентьев, А.Б. Юрчук – М.: Эко-Трендз, 2010. – 284 с.
60. Тихвинский В.О. Стандартизация, спецификация, эволюция технологии и архитектура базовой сети LTE [Текст] / В.О. Тихвинский, С.В. Терентьев, И.В. Минаев // Сети и средства связи, № 2(10). Специальный выпуск «Сети доступа» - 2009 - №3. С.: 34-39.
61. Тихвинский В.О. Технологические принципы глобальной совместимости сетей LTE с мобильными сетями других стандартов [Текст] / В.О. Тихвинский // Материалы конференции «Глобальная

- совместимость – актуальная проблема современных телекоммуникаций». – 2010.
62. Тихвинский В.О. Управление и качество услуг в сетях GPRS/UMTS / В.О. Тихвинский – М.: Экотрендз. 2007. 461с.
63. Турупалов В.В. Оптимізація каналного ресурсу Ad-Hoc мереж методом найкоротшого шляху [Текст] / В.В. Турупалов // - Восточно-Европейский журнал передовых технологий ISSN 1729-3774. – 5/9 (59) 2012 , стор. 10-12.
64. Филлипс Д. Методы анализа сетей [Текст] / Д. Филлипс, А. Гарсиа-Диас – М.: Мир, 1984.
65. Хатунцев А.Б. Перспективы и предпосылки внедрения сетей пятого поколения в России [Текст] / А.Б. Хатунцев // – Технологии информационного общества. Т-Сопн №10. 2010 С.: 46-49.
66. Хімчак Т.І. Питання впровадження технології WiMAX та LTE в Україні [Текст] / Т.І. Хімчак, А.О. Бернадська // - Наукові записки УНДІЗ, №4(20), 2011 - с. 93-97
67. Хиленко В.В., Про проблему раціонального визначення ринків телекомунікаційних послуг в Україні [Текст] / В.В. Хиленко, Г.Ф. Колченко, О.Г. Варфоломеева, О.В. Смірнова // Наукові записки УНДІЗ. –2007. –№1. –С. 40-47.
68. Чеботарёва Д.В. Многокритериальная оптимизация проектных решений при планировании сотовых сетей мобильной связи. Монография / Д.В. Чеботарёва , В.М. Безрук –. Х. СМІТ 2013. 147 с.
69. Чимишкян С. Распределенные алгоритмы управления [Электронный ресурс] / С. Чимишкян // Мир компьютерной автоматизации - Распределенные алгоритмы управления. – Режим доступа: <http://www.mka.ru/?p=40083#>.– Дата доступа 13.01.2012. – Загл. с экрана.
70. Шмалько, А.В. Цифровые сети связи. Основы планирования и построения [Текст] / А.В. Шмалько. – М.: Эко-Трендз, 2001. – 284 с.

- 71.Электросвязь. Концепция развития телекоммуникаций в Украине. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://electrosvyaz.com/forum/viewtopic.php?t=12960> – дата доступа 18.02.2014 г. – Загол.з экрану.
72. Юдин Д. Б. Задачи и методы стохастического программирования // М.: Советское радио, 1979.
- 73.Al-Janabi H.D.K. Model guaranteed transmission rate providing in WiMax downlink [Электронный ресурс] / H.D.K. Al-Janabi, A.M.K. Al-Dulaimi, A.H. Abed // Электронное научное специализированное издание – журнал «Проблемы телекоммуникаций» №1(10), 2013 стр 83-90 (<http://pt.journal.kh.ua>).
- 74.Baccelli F. Synchronization and Linearity: An algebra for discrete events systems / F. Baccelli, G. Cohen, G. J. Olsder, J.-P. Quadrat. – New York : Wiley, 1992.
- 75.Bjorklund Patik Applications of resource optimization in wireless networks [Текст] / P. Bjorklund - Linkoping Studies in Science and Technology. - Dissertation No. 1029. Norrkoping 2006. – 139pp.
- 76.Cassandras, C. G. Introduction to Discrete event Systems/ C.G. Cassandras, S. Lafortune. – Kluwer academic Publishers, 1999.
- 77.Chang C.S. A bandwidth sharing theory for a large number of http-like connections [Текст] / C.S. Chang, Z. Liu // IEEE/ACM Transactions on Networking 12 (5)(2004) 952–962.
- 78.Cho J. Utility max-min flow control using slope-restricted utility functions [Текст] / J. Cho, S. Chong // IEEE Transactions on Communications 55 (5)(2007) 963–972.
- 79.Cunnindham-Green, R. Minimax Algebra and applications/ R. Cunnindham-Green// advanced in Imaging and Electron Physics. Vol.90. – New York: Academic

80. Capone A. Channel Assignment Problem in Cellular Systems: A New Model and a Tabu Search Algorithm [Текст] / A. Capone, M. Trubian // IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 48, pp. 1252-1260, 1999
81. David R. Petri Nets and Grafset: Tools for Modeling discrete event Systems [Текст] / R. David, H. Alla. // London: Prentice Hall, 1992. – ISBN: 0-13-327537-X.
82. Ermoliev Y. Stochastic quasigradient methods and their application to system optimization, Stochastics 9 (1–2) (1983) 1–36.
83. Gamst A. Application of Graph Theoretical Methods to GSM Radio Network Planning [Текст] / A. Gamst // Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems, pp. 942-945, 1991.
84. Hande A. Distributed uplink power control for optimal SIR assignment in cellular data networks, in [Текст] / A. Hande, S. Rangan, M. Chiang // IEEE INFOCOM, 2006, pp. 1–13.
85. Hoffman K.L. A method for globally minimizing concave functions over convex sets [Текст]. / K.L. Hoffman // Math. Prog., 1981, 20, № 4, 22-32.
86. HSPA to LTE-Advanced: 3GPP Broadband evolution to IMT Advanced (4G) – 3G Americas, Rysavy Research, September 2009.
87. Jean-Yves Le Boudec Min-plus and Max-plus System Theory Applied to Communication Networks / Jean-Yves Le Boudec, Patrick Thiran // LCA-ISC-I&C, EPFL, Lausanne, Switzerland. Volume 294/2004
88. Kall P. Stochastic Programming, Wiley/ P.Kall, S.W. Wallace // 1994.
89. Kelly F. Charging and rate control for elastic traffic [Текст] / F. Kelly // European Transactions on Telecommunications 8 (1) (1997) 33–37.
90. Kelly F. Rate control in communication networks: shadow prices, proportional fairness and stability [Текст] / F. Kelly, A. Maulloo, D. Tan, // Journal of the Operational Research Society 49 (3) (1998) 237–252.
91. Koster A.M.C.A. Frequency Assignment: Models and Algorithms [Текст] / A.M.C.A. Koster // PhD Thesis, Proefschrift, Universiteit Maastricht, Netherlands, 1999.



92. Lai W.K. Channel Assignment through Evolutionary Optimization [Текст] / W.K. Lai, G.G. Coghill // IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 45, pp. 91-95, 1996.
93. Lee J.-W. Opportunistic power scheduling for dynamic multi-server wireless systems [Текст] / J.-W. Lee, R. Mazumdar, N.B. Shroff // IEEE Transactions on Wireless Communications 5 (6) (2006) 1506–1515
94. Lee J.-W. Utility-optimal random-access protocol [Текст] / J.-W. Lee, M. Chiang, A. Calderbank, // IEEE Transactions on Wireless Communications 6 (7) (2007) 2741–2751.
95. Low S.H. Optimization flow control: Basic algorithm and convergence [Текст] / S.H. Low, D.E. Lapsley // IEEE/ACM Transactions on Networking 7 (6)(1999) 861–874.
96. LTE в мире: первые итоги [Электронный ресурс] // Новости мира сетей блог ASP 24 Режим доступа: <http://asp24.com.ua/blog/lte-v-mire-pervye-itogi/> - дата доступа 13.02.2014 г. – Загол. з екрану.
97. LTE. Моделирование дальности действия и пропускной способности базовой станции мобильных сетей. [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.moluch.ru/archive/31/3562/> дата доступа 04.04.2014.
98. Ma K. On the performance of primal/dual schemes for congestion control in networks with dynamic flows / K. Ma, R. Mazumdar, J. Luo // Proceedings of IEEE INFOCOM, 2008.
99. Mossig K. Einfuehrung in die “Max-Plus”-Algebra zur Beschreibung ereignisdiskreter dynamischer Prozesse [Текст] / K. Mossig, A. Rehkopf // Automatisierungstechnik. Vol. 44. – Karlsruhe, 1996. – P. 3-9.
100. Miller K. Utility max-min fair congestion control with time-varying delays [Текст] / K. Miller, T. Harks // in: IEEE INFOCOM, 2008, pp. 968–976.
101. Olsder, G. J. Eigenvalues of dynamic max-min systems / G. J. Olsder // Discrete Event Dynamic Systems: Theory And Applications. Vol. 1. – Sept. 1991. – P. 177-207.

102. Popovskij V. Control and Adaptation in Telecommunication Systems: Mathematica Foundations (Lecture Notes in Electrical Engineering) /V. Popovskij // Publisher: Springer, 2011. – 187 p.
103. Sathyendran A. A Theoretical Study of the Performance Improvement in GSM Networks due to Slow Frequency Hopping / A. Sathyendran P.J. Smith // Proceedings of the 48th IEEE Vehicular Technology Conference, pp. 2207-2211, 1998.
104. Sarkola E. Channel Assignment Methods in Frequency Hopping Cellular Radio Networks [Текст] / E. Sarkola // Proceedings of the 8th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, pp. 771-775, 1997.
105. Slaughter, R.J. Radio Electron. Eng [Текст] / R.J. Slaughter. – 1975. – V.45.- №5.- 248p.
106. Pahlavan, K. Principles of Wireless Networks [Текст] / K. Pahlavan, P. Krishnamurthy. – New Delhi: Prentice-Hall of India Private Limited, 2006. – 584p.
107. Prou J., Controllability in the max-algebra [Text] / Prou J., Wagneur E. // Kybernetika, vol. 35 issue 1. – Prague, 1999. – P. 13-24.
108. Hao Wang. Efficient and robust traffic engineering in a dynamic environment / Hao Wang // ProQuest Dissertations and Theses; 2009; ProQuest Dissertations & Theses A&I.
109. Yi Y. Stochastic network utility maximization [Текст] / Y.Yi, M. Chiang // European Transactions on Telecommunications 19 (4) (2008) 421–442.
110. Zhang S. Distributed rate allocation for inelastic flows [Текст] / P. Hande, S. Zhang, M. Chiang // IEEE/ACM Transactions on Networking 15 (6) (2007) 1240–1253.

