ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Одним з головних пріоритетів України, закріплених на законодавчому рівні, є побудова орієнтованого на інтереси людей, відкритого для всіх і спрямованого на розвиток інформаційного суспільства. Матеріальну й одночасно системоутворюючу основу такого суспільства складають телекомунікаційні системи (ТКС), які розвиваються у напрямку створення мереж наступного покоління (*Next Generation Network, NGN*). У рамках *NGN* однією з найважливіших є проблема гарантованого забезпечення якості обслуговування (*Quality of Service, QoS*), під час розв'язання якої важлива роль відводиться засобам (протоколам, механізмам) управління трафіком.

Актуальність теми. В силу різноманітності функцій і неоднорідності структурно-функціональної побудови система телекомунікацій є складною організаційно-технічною системою. В зв'язку з цим більшість задач аналізу та синтезу ТКС з позицій системного підходу розв'язується в межах відповідної теорії телекомунікаційних систем, яка інтенсивно розвивається останнім часом. В Україні найбільш вагомий внесок у становлення й розвиток теорії ТКС вніс проф. В.В. Поповський. При цьому важливою складовою даної теорії є теорія управління трафіком, основоположниками якої по праву можна вважати таких учених як L. Kleinrock, R. Gallager, L.R. Ford, D.R. Fulkerson, Г.П. Захаров та ін. Також значний внесок у вивчення теоретичних і практичних питань управління трафіком внесли зарубіжні вчені, серед яких K. Nahrstedt, S. Floyd, H. Zhang, L. Zhang, J. Crowcroft, A. Orda, J.J. Garcia-Luna-Aceves, R. Guerin, David D. Clark, Shenker S., Jacobson V. та ін., а також вчені України й близького зарубіжжя: В.К. Стеклов, В.В. Поповський, Л.Н. Беркман, В.М. Вишневський, Я.С. Димарський, Г.Г. Яновський, А.Н. Назаров та ін. Тензорний підхід до розв'язання телекомунікаційних задач став можливий завдяки науковим працям В.В. Поповського, О.В. Лемешко, І.В. Стрелковської, а також представників близького зарубіжжя – І.І. Пасечнікова, М.Н. Петрова та ін.

Задача управління трафіком ускладнюється за рахунок ряду вимог до сучасних ТКС. Перш за все це стосується підтримки мультисервісності й мультимедійності; забезпечення гарантій якості обслуговування одночасно за декількома показниками *QoS*, а в перспективі переходу від оцінок якості на рівні мережі (*Network Performance, NP*) до оцінок якості обслуговування на рівні кінцевих користувачів (якість, що сприймається – *Quality of experience, QoE*). Крім того до цих вимог слід віднести реалізацію динамічних і багатошляхових стратегій управління трафіком на основі постійного моніторингу стану ТКС (завантаженості мережних вузлів, трактів передачі); відмову від адміністративних (ручних) втручань і реалізацію переважно автоматичних динамічних рішень; узгоджене управління різнорідними мережними ресурсами. Проте задоволення цих вимог нерідко супроводжується низькою масштабованістю отримуваних рішень щодо управління трафіком, де властивість масштабованості пов'язана зі здатністю системи зберігати ефективність функціонування в умовах зростання територіальної розподіленості, кількості трафіків, що обслуговуються, й їх типів, розширення спектра показників якості обслуговування та ін.

Реалізація комплексу зазначених вимог пов'язана з переглядом відомих технологічних і протокольних рішень щодо управління трафіком. Основним стримуючим фактором при цьому, як показав аналіз, є недосконалість математичних моделей (а здебільшого це найпростіші графокомбінаторні та потокові моделі) і методів, покладених в основу відомих технологій і протоколів, через реалізацію переважно статичного й адміністративного управління, відсутність гарантій щодо необхідної якості обслуговування та ін.

Системний характер управління трафіком, як показав проведений аналіз, здатна забезпечити стратегія *AMMO* (*Assess*, *Monitor*, *Manage*, *Optimize*), яка передбачає оцінювання (*Assess*) поточного стану об'єкта управління на основі результатів його спостереження (*Monitor*) з метою формування управління (*Manage*), яке оптимізує (*Optimize*) даний об'єкт із погляду певного критерію. Реалізація стратегії *AMMO* найбільшою мірою узгоджується з математичним описанням ТКС у просторі станів у вигляді системи диференційно-різницевих рівнянь. На підставі взаємодоповнюючого поєднання структурного та функціонального описання ТКС з погляду наступного узагальнення й з метою підтримки гарантій щодо якості обслуговування одночасно за декількома показниками *QoS* перспективним є застосування тензорних моделей ТКС. Забезпечення масштабованості управляючих рішень потребує застосування декомпозиційних підходів, серед яких заслуговують на увагу різні ієрархічно-координаційні принципи для моделей у просторі станів й діакоптики Г. Крона для тензорних моделей.

Таким чином, є актуальною **науково-прикладна проблема**, яка полягає в розробці теоретичних основ забезпечення якості обслуговування при реалізації динамічних і багатошляхових стратегій управління трафіком у мультисервісних телекомунікаційних системах на основі їх динамічних моделей у просторі станів, діакоптичних і тензорних моделей.

Зв'язок роботи з науковими програмами планами й темами. Роботу виконано відповідно до положень «Концепції національної інформаційної політики», «Концепції Національної програми інформатизації», «Концепції конвергенції телефонних мереж і мереж з пакетною комутацією в Україні» і з «Основними засадами розвитку інформаційного суспільства в Україні на 2007-2015 роки». Матеріали дисертації знайшли застосування в ряді науково-дослідних робіт (НДР): «Методи проектування мереж *NGN* та управління їх ресурсами» (НДР №235-1), яка виконувалася Харківським національним університетом радіоелектроніки; «Теоретичні дослідження умов і можливостей експлуатації базових станцій рухомого стільникового зв'язку стандартів *GSM*-900/1800 з використанням груп каналів (смуг радіочастот)» (шифр «Смуга-УМЗ-3»), яка виконувалася Харківським державним регіональним науково-технічним центром з питань технічного захисту інформації; НДР «Розробка КСТ «Програма й методика випробувань протоколу ініціювання сеансу *SIP* при прийманні обладнання в експлуатацію» (ДР № 0108U004407), яка виконувалася Державним підприємством «Одеський науково-дослідний інститут зв'язку» (ОНДІЗ); НДР «Розробка ГСТУ «Показники якості обслуговування викликів і

якості надання основних телекомунікаційних послуг абонентам телекомунікаційних мереж рухомого зв'язку загального користування України» (тема №П15/2005-21, ДР №0105U008521) і НДР «Підвищення ефективності технічної експлуатації мережі передавання даних ВАТ «Укртелеком» (тема №579/2008-24, ДР №0108U010084), які виконувалися Державним підприємством «Український науково-дослідний інститут зв'язку» (УНДІЗ) .

Мета роботи – підвищення якості обслуговування в мультисервісних телекомунікаційних системах.

У дисертаційній роботі під час вирішення наукової проблеми були поставлені й вирішені такі наукові **завдання дослідження**:

- аналіз стану й перспектив розвитку мережних концепцій, технологій і протоколів мультисервісних ТКС;
- аналіз теоретичних результатів в області управління трафіком з підтримкою якості обслуговування;
- розробка й удосконалення тензорних моделей і формулювання умов забезпечення якості обслуговування;
- розробка й удосконалення ієрархічно-координаційних моделей і методів управління трафіком у мультисервісних ТКС;
- розробка діакоптичних моделей і методів управління трафіком у територіально-розподілених ТКС;
- оцінка ступеня адекватності розроблених моделей і ефективності управління, організованого на основі запропонованих моделей і методів;
- розробка рекомендацій із практичної реалізації запропонованих моделей і методів управління в сучасних і перспективних ТКС.

Об'єктом дослідження є процеси управління трафіком із забезпеченням якості обслуговування в мультисервісних ТКС.

Предметом дослідження є моделі ТКС і методи управління трафіком із забезпеченням якості обслуговування в мультисервісних ТКС.

Методи дослідження. Етап формулювання й обґрунтування вимог до системного описання ТКС базується на принципах і постулатах теорії систем. Під час розробки тензорних і діакоптичних моделей використано математичні апарати тензорного обчислення й аналізу, діакоптики, диференціальної геометрії, а також результати теорії масового обслуговування. Під час розробки динамічних моделей ТКС у просторі станів і в процесі синтезу на їхній основі методів управління трафіком використано методи диференційно-різницевих рівнянь станів, результати теорії оптимального й адаптивного управління, теорії ієрархічних багаторівневих систем, оптимізаційні методи дослідження операцій. На етапі оцінки адекватності розроблених моделей і ефективності управління, організованого на основі запропонованих моделей і методів, використано методи імітаційного моделювання й лабораторного експерименту.

Наукова новизна отриманих результатів.

Головним науковим результатом дисертаційної роботи є розвиток теорії ТКС, управління трафіком і забезпечення якості обслуговування за рахунок розробки нових моделей ТКС і методів управління трафіком, які забезпечують ви-

конання вимог одночасно за декількома *QoS*- та *QoE*-показниками, збалансоване використання мережних ресурсів і в цілому відповідають вимогам системного характеру. У межах головного результату отримано такі наукові результати:

1. При розробці тензорних моделей під час геометризації структури ТКС уперше запропоновано використовувати наступні системи координат (СК):

- ортогональну СК контурів і розрізів, яка є узагальненням раніше відомої СК контурів і вузлових пар;
- ортогональну СК шляхів і внутрішніх розрізів, яка допускає використання будь-яких у т.ч. і замкнених шляхів як базисних, і є узагальненням раніше відомої СК шляхів і внутрішніх вузлових пар;
- неортогональну СК дерев,
- СК змішаного типу,

що в цілому дозволило розширити перелік розв'язуваних за допомогою тензорних моделей ТКС прикладних задач щодо управління трафіком.

2. У межах тензорного подання ТКС уперше запропоновано використовувати нові метрики простору, які більш повно враховують характер мережного трафіка й процеси його обробки, а саме самоподібність, пріоритетність і багатоканальність обслуговування, обмеженість буферного ресурсу на вузлах мережі, що дозволило більш адекватно описати процес управління за допомогою тензорних моделей ТКС.

3. Уперше запропоновано тензорну [*NP, πω*]-модель ТКС з використанням ортогонального базису контурів і розрізів мережі, на основі якої отримано в аналітичному вигляді умови забезпечення якості обслуговування під час розв'язання задач управління трафіком з нормуванням основних міжкінцевих показників якості обслуговування мережного рівня (*NP*-оцінок) за окремими підмережами.

4. Уперше запропоновано тензорну модель ТКС із використанням оцінок кінцевих користувачів *QoE* і отримано умови забезпечення якості обслуговування для мовного трафіка, трафіка відеоконференцій і трафіка перегляду інформації в *Web* за оцінками *QoE* (*MOS* або *R*), що дозволило за рахунок більш повного врахування особливостей обслуговування трафіків даного типу підвищити продуктивність мережі в умовах, коли за використання моделей *NP*-класу задовольнити *QoS*-вимоги не вбачається можливим.

5. Набула подальшого розвитку тензорна [*NP, πη-γε*]-модель ТКС, новизна якої полягає у використанні трьох базисів (гілок, контурів і вузлових пар мережі, шляхів і внутрішніх розрізів), що дозволяє більш гнучко формувати *QoS*-обмеження для різних показників якості обслуговування відповідно до їхньої критичності для даного типу трафіка: для більш критичного *QoS*-показника пропонується використовувати умови, що були отримані в базисі контурів і вузлових пар, а для інших *QoS*-показників – умови, що були отримані в базисі шляхів і внутрішніх розрізів.

6. Уперше отримано умови застосування тензорних моделей ТКС різних класів складності, заснованих на використанні афінних або криволінійних СК

евклідового простору, що дозволило знизити складність практичної реалізації запропонованих моделей при управління трафіком.

7. Набув подальшого розвитку дворівневий метод ієрархічно-координаційного адаптивного управління трафіком у територіально-розподіленій ТКС, новизна якого полягає у використанні, по-перше, декомпозиційного принципу послідовної координації, по-друге, агрегованої топологічної інформації про стан мережі, по-третє, у трактуванні задачі визначення характеристик абонентського трафіка як задачі адаптації. Це дозволило підвищити масштабованість управління за рахунок скорочення кількості ітерацій оптимізаційних і адаптаційних процедур методу, зменшити обсяг службового навантаження й інерційність управління трафіком мережі.

8. Одержав подальший розвиток дворівневий метод ієрархічно-координаційного управління трафіком в багатооператорських мережах, новизна якого полягає в організації міжмережного управління за принципом послідовного включення маршрутів і використанні в агрегованому вигляді інформації про *QoS*-зобов'язання між окремими операторами зв'язку, тобто *SLS*-топології, що дозволило безітераційно визначити міжмережний маршрут, який відповідає міжкінцевим *QoS*-вимогам з урахуванням *QoS*-зобов'язань операторів.

9. Вперше запропоновано тензорну модель гетерогенної ТКС, яка базується на декомпозиційному поданні та використанні принципів діакоптики, в межах якої технологічна різнорідність підмереж визначала тип метричного простору під час геометризації структурно-функціонального подання підмереж і ТКС в цілому, що дозволило розширити область застосування тензорних моделей на гетерогенні (мультипротокольні) мережі.

10. Вперше запропоновано діакоптичний метод управління трафіком у гетерогенній ТКС, де рішення щодо управління трафіком в мережі в цілому формується на основі результатів розрахунків за окремими підмережами, об’єднання яких розглядалося як процес координатного перетворення між базисами декомпозиційованої та з’єднаної мережі в межах діакоптичної тензорної моделі ТКС.

Практична значимість отриманих результатів. Запропоновані в роботі моделі ТКС і методи управління трафіком з підтримкою *QoS* можуть розглядатися як засоби для прийняття управляючих рішень у межах нових і перспективних архітектур управління мережами *NGN*, таких як, наприклад, архітектура управління на основі потоку *FSA* (*Flow-State-Aware*), що описана в рекомендації *ITU-T* Y.2121. Вони здатні забезпечити розв'язання задачі маршрутизації, управління доступом і резервування ресурсів у відповідності до базових концепцій *QoS-based Routing, Constraint-Based Routing, Load-Balance Routing, Traffic Engineering*, які визначають напрямки вдосконалювання засобів управління трафіком.

Отримані в роботі результати були закладені під час розробки методів проектування телекомунікаційних мереж *NGN* (НДР №235-1, ХНУРЕ), використано під час дослідження умов і можливостей експлуатації базових станцій рухомого стільникового зв'язку стандартів *GSM*-900/1800 (НДР «Смуга-УМЗ-3»),

під час розробки КСТ «Програма й методика випробувань протоколу ініціювання сеансу *SIP* при прийманні обладнання в експлуатацію» (ОНДІЗ), під час розробки ГСТУ «Показники якості обслуговування викликів і якості надання основних телекомунікаційних послуг абонентам телекомунікаційних мереж рухомого зв'язку загального користування України» (НДР №П15/2005-21, УНДІЗ), під час розробки шляхів підвищення ефективності технічної експлуатації мережі передавання даних ВАТ «Укртелеком» (НДР №579/2008-24, УНДІЗ). Отримані результати використовувалися в навчальному процесі кафедри телекомунікаційних систем Харківського національного університету радіоелектроніки. Використання результатів підтверджується відповідними актами.

Особистий внесок здобувача. Всі основні наукові результати, подані в дисертаційній роботі, отримано автором самостійно й повністю опубліковано в спеціалізованій літературі [1 – 42].

У роботах, виконаних у співавторстві, особисто О.Ю. Євсєєвій належать такі наукові результати: в [1] запропоновано спосіб урахування *QoS*-показників в межах потокової моделі ТКС, поданої в просторі станів; у роботах [2, 3] проаналізовано використання декомпозиційних принципів передбачення взаємодій, оцінки взаємодій та цільової координації для розв’язання задач управління трафіком з точки зору розподілу навантаження в ієрархічних ТКС; в [4] запропоновано методику формування множини незалежних міжполюсних шляхів під час розв’язання задачі багатошляхової маршрутизаціїї в телекомунікаційних мережах, поданих графами, що не розділяються; в [5] автором обґрунтовано відповідність між трактовкою ієрархічно-координаційної маршрутизації в ТКС як гри та її розв’язанням за допомогою методу передбачення взаємодій; в роботі [6] проведено аналіз методів урахування невизначеностей стану ТКС під час розв’язання задач реструктуризації и управління трафіком; в [7] проведено аналіз проблеми скорочення кількості ітерацій координуючої процедури під час розв’язання задач ієрархічно-координаційного управління в ТКС в умовах застосування методу цільової координації; в [9] запропоновано в умовах постановки задачі управління ТКС як задачі нелінійного стохастичного оптимального адаптивного управління застосувати для її розв’язання схему розділеного адаптивного управління; в [10] запропоновано з метою скорочення кількості координуючих процедур під час розв’язання задач ієрархічно-координаційного управління в ТКС в умовах методу передбачення взаємодій ввести оцінку стійкості системи; в [11] запропоновано варіант тензорного і функторного подання категоріального опису ТКС; в [13] запропоновано метод управління трафіком у ТКС на основі балансування як канальних, так і буферних ресурсів системи; в [14] проаналізовано проблему підвищення масштабованості в ТКС з гарантованою якістю обслуговування, обґрунтовано введення аперіодичної координації в рамках ієрархічного управління; в [18] проведено огляд різних підходів до постановки та розв’язання задачі управління трафіком у ТКС, проаналізовано математичні моделі ТКС, які представлені в просторі стану та використовуються при адаптивному управлінні в ТКС; в [22] запропоновано до використання в тензорному моделюванні ТКС базис шляхів и внутрішніх розрізів; у межах ме-

режного векторного простору описано підпростори шляхів і внутрішніх розрізів, доказано їх ортогональність; продемонстровано використання запропонованого базису під час розв'язання задачі багатошляхової маршрутизації; в [24] запропоновано дворівневий метод маршрутизації з підтримкою якості обслуговування в багатооператорських мережах NGN на основі використання агрегованої топологічної інформації про мережі операторів (провайдерів); в [42] запропоновано спосіб керування чергами при управлінні трафіком на вузлах ТКС.

Апробація основних результатів, отриманих у межах дисертаційних досліджень, проводилася в ході 17 наукових конференцій, форумів і симпозіумів галузевого, державного й міжнародного рівнів [25 – 41].

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи відображено в 42 наукових працях, з яких 9 виконано без співавторства. Серед них – 24 статті в наукових журналах і збірниках наукових праць, внесених до переліків ВАК України, [1 – 24], 17 матеріалів і тез доповідей [25 – 41] і один патент України на корисну модель [42].

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, шести розділів та одинадцяти додатків. Загальний обсяг роботи складає 478 сторінки, із них 284 сторінки основного тексту, 63 сторінки з рисунками та таблицями, 94 сторінки додатків. Список використаних джерел містить 381 найменування на 37 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано наукову проблему, відображено її зв'язок з науковими програмами і темами, визначено мету, об'єкт, предмет досліджень, коло розв'язуваних завдань, сформульовано наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено дані про публікації автора за темою роботи.

У **першому розділі** проведено аналіз стану та перспектив розвитку ТКС. Показано, що сучасним і перспективним ТКС відповідно до архітектури мереж *NGN* мають бути притаманні мультисервісність, гарантована якість обслуговування, гетерогенність, багаторівневість, багатопротокольність, незалежність функцій надання послуг від транспортних технологій та ін. Однією з центральних функцій в архітектурі *NGN* є функція управління ресурсами та доступом (*Resource and Admission Control Functions, RACF*), яка полягає у відображенні рішення про управління послугою (з рівня послуг) на функції транспортної мережі з метою забезпечення якості обслуговування.

На підставі аналізу документів *ITU-T* та Державного департаменту з питань зв'язку та інформатизації України наведено класифікацію кількісних оцінок якості обслуговування в ТКС, відповідно до якої оцінками якості функціонування мережі *NP* є середній час затримки «з кінця в кінець», джитер, коефіцієнти втрат та помилок *IP*-пакетів (Y.1540), оцінками якості, що сприймається, *QoE* є рейтинг якості *R* (*Quality Rating*) (G.109) та середня експертна оцінка *MOS* (*Mean Opinion Score*) (P.800).

Аналіз існуючих технологічних рішень щодо управління трафіком продемонстрував, що здебільшого їх основу складають найпростіші комбінаторні та потокові моделі ТКС або навіть евристичні схеми й алгоритми, які не відповідають повною мірою вимогам системного характеру та, як наслідок, не здатні забезпечити високу ефективність функціонування ТКС та гарантовану *QoS*. Результати аналізу теоретичних рішень у цій області вказують на обмеженість існуючих математичних моделей, що переважно обумовлено відокремленістю в їх межах структурного та функціонального описання ТКС, відсутністю узгодженості в розв'язанні задач забезпечення *QoS* та збалансованого використання мережних ресурсів, а також узгодженості між задачами маршрутизації, управління доступом та резервування ресурсів.

Зроблено висновок про перспективне використання стратегії управління *AMMO* разом із динамічними математичними моделями ТКС у просторі станів та тензорними моделями, до яких з метою забезпечення масштабованості доцільно застосовувати декомпозиційні методи, в т.ч. діакоптику Г.Крона.

У **другому розділі** сформульовано основні напрямки розвитку тензорного підходу до моделювання ТКС, серед яких розширення переліку метрик та відповідно введення нових метричних просторів, введення нових систем координат, розширення переліку мережних параметрів, що мають тензорну природу, використання мультитензорів та тензорних полів, а також діакоптики з метою забезпечення масштабованості отриманих рішень. На ґрунті узагальнення та розвитку відомих результатів запропоновано загальну методику застосування тензорного підходу до розв'язання мережних задач ТКС.

Проведено геометризацію топологічної моделі ТКС, яка передбачає визначення векторного простору мережі, набору його базисів, а також встановлення правил координатного перетворення під час переходу з одного базису в інший. У зв'язку з цим до мережі S поставлено у відповідність векторний простір $\mathcal{W}$, який утворено множиною усіх підмереж мережі S над полем $\mathcal{F} = \{-1, 0, 1\}$ зі звичайною операцією множення та операцією алгебраїчного підсумовування, аналогічною до двійкового додавання. Розмірність $\mathcal{W}$ визначається кількістю гілок, що моделюють тракти передачі (ТП) мережі S, $\dim(\mathcal{W}) = n$.

В межах вищезазначених напрямків розвитку тензорного моделювання ТКС у просторі $\mathcal{W}$ введено нові ортогональні базиси контурів і розрізів мережі $\mathcal{G}_{\langle \pi\omega \rangle}$ та шляхів і внутрішніх розрізів $\mathcal{G}_{\langle r\varepsilon \rangle}$, які є узагальненнями раніше відомих базисів контурів та вузлових пар $\mathcal{G}_{\langle \pi\eta \rangle}$ та міжполюсних шляхів і внутрішніх вузлових пар $\mathcal{G}_{\langle \gamma\varepsilon \rangle}$ відповідно. Ці базиси утворюються шляхом об'єднання базисів двох ортогональних підпросторів: контурів розмірності $\dim(\mathcal{G}_\pi) = \mu = n - m + 1$, де m – кількість вузлів мережі, та розрізів розмірності $\dim(\mathcal{G}_\omega) = \phi = m - 1$ у випадку $\mathcal{G}_{\langle \pi\omega \rangle}$, шляхів розмірності $\dim(\mathcal{G}_r) = \kappa = \mu + 1$ та внутрішніх розрізів розмірності $\dim(\mathcal{G}_\varepsilon) = \vartheta = \phi - 1 = m - 2$ у випадку $\mathcal{G}_{\langle r\varepsilon \rangle}$.

Поряд з ортогональними системами координат для моделювання ТКС про-

понується використовувати неортогональний базис дерев та різні базиси змішаного типу. Відповідно до можливих базисів векторного простору мережі формалізовано правила формування матриць координатного перетворення A й C, що описують перехід між ними.

На основі постулатів узагальнення Г. Крона та відомих рішень викладено послідовність синтезу тензорних моделей ТКС. За основу тензорного моделювання в роботі було взято такі відомі тензорні рівняння

$$\mathbf{T}=\mathbf{E\Lambda}, \quad (1) \qquad \mathbf{\Sigma}=\mathbf{\Phi\Lambda}, \quad (2) \qquad \mathbf{P}=\mathbf{\Theta\Lambda}, \quad (3)$$

$$\mathbf{\Lambda}=\mathbf{GT}, \quad (4) \qquad \mathbf{\Lambda}=\mathbf{\Psi\Sigma}, \quad (5) \qquad \mathbf{\Lambda}=\mathbf{XP}, \quad (6)$$

де $\mathbf{T}$, $\mathbf{\Sigma}$, $\mathbf{P}$ – одновалентні коваріантні тензори середніх затримок, джитера, приведеної ймовірності доставки пакетів трафіка відповідно; $\mathbf{\Lambda}$ – одновалентний контраваріантний тензор інтенсивностей трафіка; $\mathbf{E}$, $\mathbf{\Phi}$, $\mathbf{\Theta}$ – двовалентні коваріантні тензори; $\mathbf{G}$, $\mathbf{\Phi}$, $\mathbf{X}$ – двовалентні контраваріантні тензори.

У такому випадку тензори $\mathbf{E}$, $\mathbf{\Phi}$, $\mathbf{\Theta}$ (а також $\mathbf{G}$, $\mathbf{\Psi}$, $\mathbf{X}$) можуть трактуватися як метричні та визначають три метричні простори, кожна точка яких пов'язана зі станом ТКС. Отже, метрика тензорної моделі ТКС відображує характеристики самої мережі (пропускні здатності трактів передачі та обсяги буферної ємності вузлів, особливості обробки трафіка та ін.), а також характеристики трафіка, що обслуговується нею.

В напрямку розвитку тензорного моделювання ТКС у роботі запропоновано нові правила формування координат $g^{ii}_{(v)}$ і $x^{ii}_{(v)}$ проекцій G_v і X_v ($G_v=(E_v)^{-1}$, $X_v=(\Theta_v)^{-1}$) контраваріантних метричних тензорів $\mathbf{G}$ і $\mathbf{X}$ в СК гілок $\mathcal{G}_v$. Запропоновані метрики простору більш повно враховують характер мережного трафіка й процеси його обробки, а саме самоподібність, пріоритетність і багатоканальність обслуговування, обмеженість буферного ресурсу на вузлах мережі. Наприклад, в рамках часової тензорної моделі з метою врахування самоподібного характеру мережного трафіка на основі описання елемента мережі системою масового обслуговування (СМО) *fBM*/*D*/1 пропонується

$$g^{ii}_{(v)}=\frac{\lambda^{i}_{(v)}c_i\left(1-\rho^{i}_{\Sigma(v)}\right)^{\frac{H}{1-H}}}{\left(1-\rho^{i}_{\Sigma(v)}\right)^{\frac{H}{1-H}}+\left(\rho^{i}_{\Sigma(v)}\right)^{\frac{1}{2(1-H)}}};$$

з метою врахування обмеженості буферного ресурсу на основі описання елемента мережі за допомогою СМО типу *M*/*M*/*1*/*N* пропонується

$$g^{ii}_{(v)}=\frac{\lambda^{i}_{(v)}c_i\left(1-\left(\rho^{i}_{\Sigma(v)}\right)\right)\left(1-\left(\rho^{i}_{\Sigma(v)}\right)^{N+1}\right)}{\rho^{i}_{\Sigma(v)}\left(1-\left(\rho^{i}_{\Sigma(v)}\right)^{N+1}\right)-(N+1)\left(\rho^{i}_{\Sigma(v)}\right)^{N+1}},$$

де $\rho^{i}_{\Sigma(v)}=\lambda^{i}_{\Sigma(v)}\big/c_i$, $\lambda^{i}_{\Sigma(v)}$ – інтенсивність сумарного трафіка в i-му тракті пе-

редачі, пак/с; $\lambda_{(v)}^{i}$ – інтенсивність трафіка в i-му ТП (1/с); c_i – пропускна здатність i-го ТП; H – параметр Херста (показник самоподібності трафіка); $N = N_{буф} + 1$, $N_{буф}$ – розмір буфера, пак.

У цілому використання нових метрик тензорних моделей ТКС дозволило підвищити адекватність описання процесу управління в межах тензорного підходу.

Третій розділ присвячений розробці тензорних моделей ТКС та формулюванню умов забезпечення якості обслуговування при управлінні трафіком. В розділі показано місце та роль *QoS*-умов у загальній структурі потокової моделі ТКС, наведено класифікацію тензорних моделей ТКС за типами базисів та за оцінками якості обслуговування, що використовуються в них. Введено два класи тензорних моделей: клас *NP*-моделей, пов'язаний з використанням оцінок якості обслуговування на рівні мережі, та клас *QoE*-моделей, який передбачає використання оцінок якості обслуговування на рівні кінцевих користувачів. Відповідно умови забезпечення якості обслуговування у межах класу *NP*-моделей можуть бути подані в загальному вигляді як

$$T_{NP} \le T_{NP\,вим}; \quad \Sigma_{NP} \le \Sigma_{NP\,вим}; \quad P_{NP} \le P_{NP\,вим}; \quad B_{NP} \ge B_{NP\,вим}; \qquad (7)$$

а в межах класу *QoE*-моделей як

$$MOS \ge MOS_{вим} \quad \text{або} \quad R \ge R_{вим}, \qquad (8)$$

де T_{NP}, Σ_{NP}, P_{NP}, B_{NP} – первинні показники якості обслуговування (Y.1541): середня затримка, джитер, ймовірність втрати пакета, швидкість передачі відповідно, які досягаються в мережі для певної пари адресатів; $T_{NP\,вим}$, $\Sigma_{NP\,вим}$, $P_{NP\,вим}$, $B_{NP\,вим}$ – вимоги щодо первинних показників T_{NP}, Σ_{NP}, P_{NP}, B_{NP}; MOS, R – вторинні показники якості обслуговування, які досягаються в мережі для певної пари адресатів у заданих умовах функціонування ме-режі; $MOS_{вим}$, $R_{вим}$ – вимоги до вторинних показників якості обслуговування.

Умови забезпечення якості обслуговування на рівні мережі в межах раніше відомого двобазисного підходу, наприклад, тензорної [*NP*, $\pi\eta$]-моделі, за різними показниками якості обслуговування отримувалися в одній СК; це у деяких випадках викликало труднощі обчислювального характеру на етапі їх виконання. У зв'язку з цим у роботі набула подальшого розвитку тензорна [*NP*, $\pi\eta$-$\gamma\varepsilon$]-модель ТКС, новизна якої полягає у використанні трьох базисів (гілок, контурів і вузлових пар мережі, шляхів і внутрішніх розрізів), де для більш критичного *QoS*-показника (середньої затримки для мовного трафіка або ймовірності доставки для передачі даних) пропонується використовувати умови, що були отримані в базисі контурів і вузлових пар $\mathcal{G}_{\langle \pi\eta \rangle}$, а для інших *QoS*-показників – умови, що були отримані в базисі шляхів і внутрішніх розрізів $\mathcal{G}_{\langle \gamma\varepsilon \rangle}$. Наприклад, для мовного трафіка умовою щодо забезпечення гарантій якості обслуговування за середньою затримкою є

$$\lambda^{\langle вим \rangle} \le \left(G_{\pi\eta}^{\langle 4,1 \rangle} - G_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle} \left[G_{\pi\eta}^{\langle 4,4 \rangle} \right]^{-1} G_{\pi\eta}^{\langle 4,3 \rangle} \right) \tau_{\langle вим \rangle}, \qquad (9)$$

а за показниками джитера та ймовірності доставки умови забезпечення гарантій якості обслуговування формулюються у вигляді

$$\Lambda_\gamma \le \left(\Psi_{\gamma\varepsilon}^{\langle 1 \rangle} - \Psi_{\gamma\varepsilon}^{\langle 2 \rangle} \left[\Psi_{\gamma\varepsilon}^{\langle 4 \rangle} \right]^{-1} \Psi_{\gamma\varepsilon}^{\langle 3 \rangle} \right) \Sigma_\gamma, \qquad (10)$$

$$\Lambda_\gamma \ge \left(X_{\gamma\varepsilon}^{\langle 1 \rangle} - X_{\gamma\varepsilon}^{\langle 2 \rangle} \left[X_{\gamma\varepsilon}^{\langle 4 \rangle} \right]^{-1} X_{\gamma\varepsilon}^{\langle 3 \rangle} \right) P_\gamma, \qquad (11)$$

де $\lambda^{\langle вим \rangle}$, $\tau_{\langle вим \rangle}$, $p_{\langle вим \rangle}$ – вимоги щодо інтенсивності передачі трафіка, міжкінцевої середньої затримки та міжкінцевої приведеної ймовірності доставки пакета трафіка для заданої пари адресатів; $G_{\pi\eta}^{\langle 4,1 \rangle}$, $G_{\pi\eta}^{\langle 4,2 \rangle}$, $G_{\pi\eta}^{\langle 4,3 \rangle}$, $G_{\pi\eta}^{\langle 4,4 \rangle}$ – компоненти проекції $G_{\pi\eta}$ метричного тензору **G** в СК контурів і вузлових пар $\mathcal{G}_{\langle \pi\eta \rangle}$; $\Psi_{\gamma\varepsilon}^{\langle 1 \rangle}$, $\Psi_{\gamma\varepsilon}^{\langle 2 \rangle}$, $\Psi_{\gamma\varepsilon}^{\langle 3 \rangle}$, $\Psi_{\gamma\varepsilon}^{\langle 4 \rangle}$, $X_{\gamma\varepsilon}^{\langle 1 \rangle}$, $X_{\gamma\varepsilon}^{\langle 2 \rangle}$, $X_{\gamma\varepsilon}^{\langle 3 \rangle}$, $X_{\gamma\varepsilon}^{\langle 4 \rangle}$ – компоненти проекцій $\Psi_{\gamma\varepsilon}$ та $X_{\gamma\varepsilon}$ контраваріантних метричних тензорів відповідно **Ψ** і **X** в СК шляхів і внутрішніх розрізів $\mathcal{G}_{\langle \gamma\varepsilon \rangle}$; T_γ, P_γ – κ-вимірні вектори, елементами яких є відповідно вимоги $\tau_{j\langle вим \rangle}^{(\gamma)}$ та $p_{j\langle вим \rangle}^{(\gamma)}$ щодо середньої затримки та приведеної ймовірності доставки трафіка вздовж j-го базисного γ- шляху; Λ_γ – κ-вимірний вектор, елементами якого є інтенсивність трафіка $\lambda_{(\gamma)}^i$ уздовж i-го базисного γ- шляху мережі, причому $\sum_{i=1}^{\kappa} \lambda_{(\gamma)}^i = \lambda^{\langle вим \rangle}$.

Таким чином перехід до трибазисної тензорної моделі дозволяє більш гнучко формувати *QoS*-обмеження для різних показників якості обслуговування відповідно до їхньої критичності для даного типу трафіка.

З метою розширення області застосування тензорних моделей на багатооператорські мережі, в яких *QoS*-вимоги «з кінця в кінець» повинні бути відображені на *QoS*-вимоги в межах кожного окремого оператора або провайдера (*Internet Service Provider, ISP*) (рис. 1), в роботі запропоновано тензорну [*NP, πω*]-модель ТКС у базисі контурів і розрізів $\mathcal{G}_{\langle \pi\omega \rangle}$.

Рис. 1. Показники якості обслуговування в багатооператорській мережі

В межах цієї моделі отримано умови забезпечення якості обслуговування для різних *QoS*-показників, які, наприклад, для середньої затримки мають вигляд

$$T_{вим}^{\langle\beta\rangle} \geq \left(G_{\pi\omega}^{\langle 4,1\rangle} - G_{\pi\omega}^{\langle 4,2\rangle} \left[G_{\pi\omega}^{\langle 4,4\rangle} \right]^{-1} G_{\pi\omega}^{\langle 4,3\rangle} \right)^{-1} \Lambda_{вим}^{\langle\beta\rangle}, \qquad (12)$$

$$\tau_{\langle вим\rangle} \geq I \left(\left(G_{\pi\omega}^{\langle 4,1\rangle} - G_{\pi\omega}^{\langle 4,2\rangle} \left[G_{\pi\omega}^{\langle 4,4\rangle} \right]^{-1} G_{\pi\omega}^{\langle 4,3\rangle} \right)^{-1} \Lambda_{вим}^{\langle\beta\rangle} \right), \qquad (13)$$

где $T_{вим}^{\langle\beta\rangle}$ – β-вимірний вектор вимог щодо середніх затримок (норми) за всіма ділянками мережі $\tau_{j\langle вим\rangle}^{(\omega)}$, $j = \overline{1,\beta}$; β – кількість розрізів, що відокремлюють отримувача від відправника; $\Lambda_{вим}^{\langle\beta\rangle}$ – β-вимірний вектор вимог щодо інтенсивності трафіка для заданої пари адресатів $\Lambda_{вим}^{\langle\beta\rangle} = \left\| \lambda^{\langle вим\rangle} \quad \ldots \quad \lambda^{\langle вим\rangle} \right\|^t$; I – одиничний вектор розміру β.

Вираз (12) є умовою виконання вимог щодо середніх затримок, заданих за всіма розрізами (ділянками) мережі, (13) – умовою виконання міжкінцевої середньої затримки. Якщо задано норми для i-ї підмережі, яка є об'єднаннями декількох ділянок, то умова їх виконання набуває вигляду

$$T_{вим}^{\langle i\rangle} \geq \alpha \left(\left(G_{\pi\omega}^{\langle 4,1\rangle} - G_{\pi\omega}^{\langle 4,2\rangle} \left[G_{\pi\omega}^{\langle 4,4\rangle} \right]^{-1} G_{\pi\omega}^{\langle 4,3\rangle} \right)^{-1} \Lambda_{вим}^{\langle\beta\rangle} \right), \qquad (14)$$

де α – вектор розміру β з одиничними елементами на тих позиціях, що відповідають номерам розрізів, які відокремлюють i-у підмережу від $(i+1)$-ї.

Відмінної рисою мультисерсівних ТКС є тенденція переходу під час розв'язання задач забезпечення якості обслуговування від показників *NP* до оцінок кінцевих користувачів *QoE*, які враховують специфіку трафіка, що обслуговується. Методику розрахунку цих оцінок як функцій від показників *NP* викладено в рекомендаціях G.107, G.1030, G.1070. На її основі можуть бути

отримані умови забезпечення якості обслуговування на рівні *QoE* (8), наприклад, для мовного трафіка у вигляді

$$R_0 - I_{dd}(T_{NP}) - I_{e-eff}(P_{NP}) \geq R_{вим}, \quad (15)$$

для трафіка передачі даних, пов'язаного з переглядом інформації в *Web*, у вигляді

$$\frac{4}{\ln\left(\frac{0{,}005T_{\max} + 0{,}24}{T_{\max}}\right)}\left(\ln(T_c) - \ln(0{,}005T_{\max} + 0{,}24)\right) + 5 \geq MOS_{вим}, \quad (16)$$

де R_0 – фактор, пов'язаний зі співвідношенням сигнал/шум, враховує вплив шумів, що виникають під час передачі (шуми обладнання, шуми в приміщенні та ін.); за усіх настройок за замовчуванням R_0 =93,2; $I_{dd}(T_{NP})$ – коефіцієнт зниження якості обслуговування через затримки в мережі (розраховується в межах G.107); $I_{e-eff}(P_{NP})$ – коефіцієнт зниження якості обслуговування через спотворення, що вносяться в процесі кодування/декодування, а також через втрати мовних пакетів (G.107); $MOS_{вим}$ – вимоги щодо оцінки *MOS* для односторінкового сеансу зв'язку (одна сторінка пошуку інформації в *Web*); T_c – час сеансу зв'язку (G.1030); $T_{\max}$ – максимальний час сеансу зв'язку, що очікується (G.1030).

Складність використання умов (15) – (16) для динамічних багатошляхових стратегій управління трафіком полягає в розрахунку первинних показників T_{NP} і P_{NP}, які отримати в аналітичному вигляді в межах відомих графокомбінаторних і потокових моделей ТКС неможливо. У зв'язку з цим в роботі запропоновано для розрахунку первинних показників скористатися результатами тензорного моделювання, як дво-, так і трибазисного. Наприклад, за використання моделі в СК контурів і вузлових пар маємо

$$T_{NP} = \left(G_{\pi\eta}^{\langle 4,1\rangle} - G_{\pi\eta}^{\langle 4,2\rangle}\left[G_{\pi\eta}^{\langle 4,4\rangle} \right]^{-1} G_{\pi\eta}^{\langle 4,3\rangle} \right)^{-1} \lambda^{\langle вим\rangle}, \quad (17)$$

$$P_{NP} = 1 - a^{p_1^{(\eta)}}, \; p_1^{(\eta)} = \left(X_{\pi\eta}^{\langle 4,1\rangle} - X_{\pi\eta}^{\langle 4,2\rangle}\left[X_{\pi\eta}^{\langle 4,4\rangle} \right]^{-1} X_{\pi\eta}^{\langle 4,3\rangle} \right)^{-1} \lambda^{\langle вим\rangle}. \quad (18)$$

За використання тензорної моделі в СК шляхів і внутрішніх розрізів первинні показники можуть бути визначені за аналогічними до (10) – (11) виразами, але поданими у формі рівності, де $T_{NP} = \max_j\left(\tau_j^{(\gamma)}\right)$, $P_{NP} = \max_j\left(1 - a^{p_j^{(\gamma)}}\right)$.

Отримані на основі тензорних моделей умови забезпечення якості обслуговування (9) – (16) займають важливе місце при формулюванні оптимізаційних задач щодо управління трафіком з підтримкою *QoS*.

Всі умови (9) – (16) отримано в криволінійних системах координат евклідового простору, а тому вони мають нелінійний характер, що обумовлено нелінійною залежністю метричного тензору від характеристик трафіка, показників якості обслуговування та ін. Це сприяє підвищенню адекватності описання, але, як правило, ускладнює практичну реалізацію, в тому числі і з точки зору обчислювальної складності. У зв'язку з цим в роботі досліджено умови апроксимації метричного тензора деякою постійною величиною, що дає можливість отримати рішення щодо управління трафіком в аналітичному вигляді без застосування оптимізаційних процедур. В результаті апроксимації, яка розглядалася як задача пошуку геодезичних кривих у метричному просторі, були отримані умови використання спрощеної моделі (з постійним метричним тензором). Встановлено, що основними факторами при цьому є структура доступних шляхів між адресатами, їх пропускні здатності, поточна завантаженість мережі. В цілому апроксимація метрик є припустимою:

- у випадку, коли всі доступні для передачі шляхи однакові як за пропускними здатностями, так і за кількістю переприйомів («ідеальна структура»);

- у випадку, коли доступна пропускна здатність дорівнює подвоєному обсягу трафіка $2\lambda^{\langle вим \rangle}$ (геодезична крива). За наявності відхилень від вказаних вимог виникають розбіжності в розподілах трафіка $\Delta\lambda$, однак вони зменшуються з наближенням структури шляхів до «ідеальної» і можуть не перевищувати 2-3%, а в середньому складають 4-5%;

- у випадку, коли сумарна завантаженість мережі близька до $\rho_м \approx 0{,}5$.

В інших умовах, а також для забезпечення якості обслуговування одночасно за декількома *QoS*-показниками спрощення тензорної моделі не припустиме.

В **четвертому розділі** показано, що в умовах багатооператорських мереж під час розв'язання задачі управління трафіком слід враховувати, що мережа кожного окремого оператора знаходиться під своїм адміністративним керуванням і гарантує певну якість обслуговування, що відбито у відповідній специфікації (*Service Level Specification, SLS*). У зв'язку з цим у роботі пропонується дворівневий метод ієрархічного управління трафіком з підтримкою *QoS*, в якому рішення про міжмережні маршрути (задача верхнього рівня) приймається на основі встановленої між операторами (провайдерами) угоди про порядок обробки транзитного трафіка та наявних *SLS*. Для цього на верхньому рівні (ВР) кожна окрема підмережа була подана у вигляді *SLS*-топології (рис. 2), яка відображує *QoS*-зобов'язання відповідного оператора. Запропонований метод враховує описаний в Y.1542 принцип «накопичення похибок» (accumulation impairments).

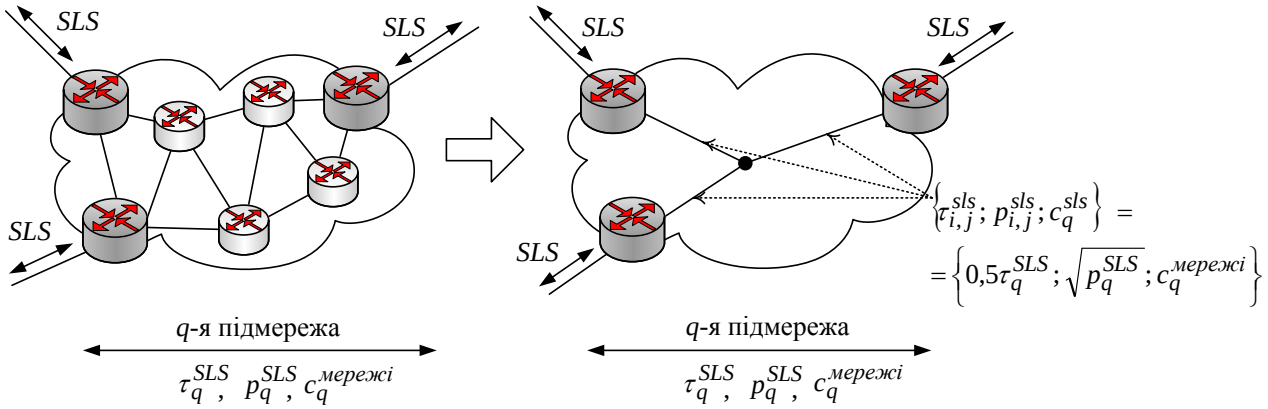


Рис. 2. Приклад *SLS*-топології підмережі

Тоді задачею ВР, розв'язання якої покладено на центральний сервер маршрутів (*Central Route Server, CRS*), є пошук у *SLS*-топології всієї мережі маршрутів, які відповідають міжкінцевим *QoS*-вимогам. Задача пошуку міжмережних маршрутів була формалізована як оптимізаційна з цільовою функцією

$$\sum_{i,j} f_{i,j}\lambda_{i,j} \to \min, \tag{19}$$

за обмежень

$$\begin{cases} \sum_i \lambda_{k,i} - \sum_i \lambda_{i,k} = \lambda_{k,l}^{\langle вим \rangle}; \\ \sum_i \lambda_{i,j} - \sum_i \lambda_{j,i} = 0; \\ \sum_i \lambda_{l,i} - \sum_i \lambda_{i,l} = -\lambda_{k,l}^{\langle вим \rangle}; \end{cases} \tag{20}$$

$$\lambda_{i,j} \le c_{i,j}^{sls}, \tag{21}$$

$$\sum_{(i,j):\lambda_{i,j}\neq 0} \tau_{i,j}^{sls} \le \tau_{k,l}^{\langle вим \rangle}, \tag{22}$$

$$\prod_{(i,j):\lambda_{i,j}\neq 0} p_{i,j}^{sls} \le p_{k,l}^{\langle вим \rangle}, \tag{23}$$

де $f_{i,j}$ – умовна вартість використання гілки (i,j), що з'єднує i-й та j-й вузли в *SLS*-топології мережі; $\lambda_{i,j}$ – інтенсивність трафіка в гілці (i,j) *SLS*-топології мережі; $\lambda_{k,l}^{\langle вим \rangle}$, $\tau_{k,l}^{\langle вим \rangle}$, $p_{k,l}^{\langle вим \rangle}$ – міжкінцеві вимоги щодо показників якості обслуговування (інтенсивність трафіка, середня затримка, імовірність доставки пакета) між k-м та l-м вузлами-адресатами в *SLS*-топології мережі.

Результатом розв'язання задачі (19) – (23) є сукупність міжмережних маршрутів для заданої пари адресатів із зазначенням для кожної окремої мережі обсягів транзитних трафіків. Задача нижнього рівня (НР) покладається на маршрутні сервери (*Route Server, RS*) мереж окремих операторів і полягає у маршрутизації трафіка з підтримкою *QoS* всередині підмереж за умови відомого внутрішнього та транзитного трафіка (за результатами розв'язання задачі ВР). Задача НР формалізована в межах потокової моделі ТКС у просторі станів з квадратичним цільовим функціоналом, яка доповнена *QoS*-обмеженнями для кожної пари вузлів-адресатів

$$c_{(r)} \le \left(G_{\pi\eta}^{\langle 4,1\rangle} - G_{\pi\eta}^{\langle 4,2\rangle} \left[G_{\pi\eta}^{\langle 4,4\rangle} \right]^{-1} G_{\pi\eta}^{\langle 4,3\rangle} \right) \tau^{SLS}, \qquad (24)$$

$$c_{(r)} \le \left(X_{\pi\eta}^{\langle 4,1\rangle} - X_{\pi\eta}^{\langle 4,2\rangle} \left[X_{\pi\eta}^{\langle 4,4\rangle} \right]^{-1} X_{\pi\eta}^{\langle 4,3\rangle} \right) \log_a \left(p^{SLS} \right), \qquad (25)$$

де $c_{(r)}$ – пропускна здатність, яка виділена для трафіка, що передається між r-ою парою приграничних вузлів мережі; τ^{SLS}, p^{SLS} – вимоги до показників якості обслуговування (средньої затримки і ймовірності доставки пакета) трафіка в межах даного провайдера.

В цілому метод реалізує багатошляхову стратегію маршрутизації як між мережами, так і всередині них, виконання міжкінцевих *QoS*-вимог, узгодженість між задачами управління маршрутами, доступом та процесом резервування. До переваг методу слід віднести масштабованість отримуваних рішень завдяки розгляданню задачі міжмережного управління як задачі *QoS*-маршрутизації агрегованого трафіка на *SLS*-топології, а задачі управління всередині підмереж – як задачі маршрутизації та одночасно і розподілу канальних і буферних ресурсів з підтримкою *QoS*.

В сучасних телекомунікаційних мережах основним фактором, що впливає на ефективність функціонування та якість обслуговування, є нестаціонарний характер абонентського трафіка, що має бути враховане під час розробки моделей, методів та отримуваних на їх основі протоколів управління трафіком. У зв'язку з цим, а також з метою забезпечення масштабованості та підвищення ефективності функціонування мереж з гарантованою якістю обслуговування, що знаходяться під єдиним адміністративним керуванням, в роботі запропоновано метод адаптивного управління трафіком. Метод базується на декомпозиційному поданні задачі в рамках моделі в просторі станів, застосуванні принципу послідовної координації та ідей адаптації до характеристик трафіка. Метод передбачає послідовне розв'язання двох задач адаптації, першого та другого рівнів, і задачі оптимального управління.

Задача адаптації першого рівня полягає в ідентифікації обсягів абонентського навантаження, що надходить на вузли мережі:

$$\varphi_{q.i,g.j}(k+1) = \varphi_{q.i,g.j}(k) - \theta(k)\left[\hat{x}_{q.i,g.j}(k+1) - x_{q.i,g.j}(k+1)\right], \qquad (26)$$

де $\varphi_{q.i,g.j}(k+1)$ – параметр, що підстроюється (дорівнює обсягу абонентського навантаження $\vec{y}^{\,аб*}(k+1)$, що, як очікується, надійде на вузол $q.i$ та буде адресований до вузла $g.j$ в момент часу t_{k+1}); $\hat{x}_{q.i,g.j}(k+1)$, $x_{q.i,g.j}(k+1)$ – відповідно результат вимірювання та розрахункове значення розміру черги на вузлі $q.i$, що містить пакети, адресовані до вузла $g.j$; $\theta(k)$ – крок алгоритму.

Задача адаптації першого рівня покладається на самі вузли мережі. Результати її розв'язання передаються через сервери маршрутів підмереж (*subnetwork RS, sRS*) до сервера *RS* всієї мережі, де розв'язується наступна задача.

Задача адаптації другого рівня полягає у визначенні міжмережних маршрутів і обсягів зовнішнього та транзитного навантаження, що передається між підмережами. Її розв'язання базується на використанні агрегованої топологічної інформації (рис. 3), де кожен вузол моделює цілу підмережу. Задача формалізується як оптимізаційна з цільовим функціоналом

$$J^{вр} = \sum_{k=1}^{K}\left[\left(\vec{x}^{вр}(k)\right)^t Q_x^{вр}\vec{x}^{вр}(k) + \left(\vec{u}^{вр}(k)\right)^t Q_u^{вр}\vec{u}^{вр}(k)\right] \to \min, \quad (27)$$

за наявності обмежень, що описують динаміку інформаційного обміну між підмережами,

$$\vec{x}^{вр}(k+1) = \vec{x}^{вр}(k) + B^{вр}(k)\vec{u}^{вр}(k) + \vec{y}^{вр}(k), \quad (28)$$

де $Q_x^{вр}$, $Q_u^{вр}$ – діагональні вагові матриці; $\vec{x}^{вр}(k)$ – вектор стану ВР, елементами якого є сумарні обсяги даних $x_{q,g}(k) = \sum_{j=1}^{N_g}\sum_{i=1}^{N_q} x_{q.i,g.j}(k)$, що знаходяться у буферах усіх вузлів q-ї підмережі, та призначені до вузлів g-ї мережі; $\vec{u}^{вр}(k)$ – вектор управління ВР, елементами якого є частки $u_{q,r}^{g}(k)$ пропускної здатності агрегованих трактів передачі між q-й і r-й підмережами, які виділяються для трафіка, адресованого до g-ї мережі; $B^{вр}(k)$ – матриця з елементами $\pm b_{q,r}(k) = \pm c_{q,r}(k)\Delta t$; $c_{q,g} = \sum_{j=1}^{N_g}\sum_{i=1}^{N_q} c_{q.i,g.j}$ – пропускна здатність агрегованих трактів передачі між q-й і g-й підмережами; $\vec{y}^{вр}(k)$ – вектор навантаження, елементами якого є обсяги навантаження $y_{q,g}(k) = \sum_{j=1}^{N_g}\sum_{i=1}^{N_q} y_{q.i,g.j}^{аб}(k)$, який надійшов у момент часу t_k на вузли q-ї мережі та призначений адресатам в g-й мережі; Q – кількість підмереж; N_q – кількість вузлів в q-й підмережі.

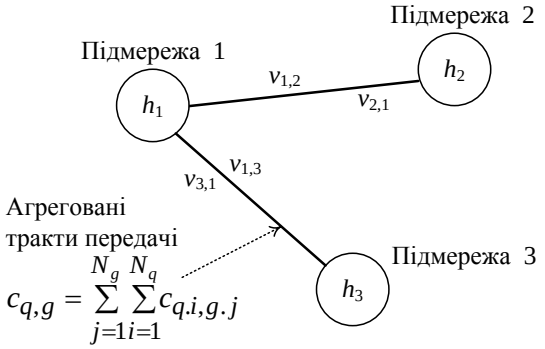


Рис. 3. Топологічна інформація ВР

На змінні стану та управління накладаються обмеження, що пов'язані з їх фізичним змістом

$$0 \le x_{q.i,g.j}(k) \le x_{q.i,g.j}^{\max}, \quad (29) \qquad 0 \le u_{q.i,r.l}^{g.j}(k) \le 1, \quad (30) \qquad \sum_{g=1}^{Q}\left(\sum_{j=1}^{N_g} u_{q.i,r.l}^{g.j}(k)\right) \le 1. \quad (31)$$

Результатом розв'язання є вектор управління $\vec{u}^{вр}(k)$, який визначає по-перше, порядок міжмережної маршрутизації, по-друге, обсяги зовнішнього навантаження, яке крім абонентського надходить до вузлів мережі. Отримані результати з *RS* передаються до *sRS*, де розв'язується наступна задача.

Задача оптимального управління (нижнього рівня) полягає власне в пошуку оптимального управління в межах окремої q-ї підмережі. Вихідними даними є обсяги абонентського та зовнішнього навантаження, топологічна інформація, подана у детальному вигляді для q-ї підмережі та в агрегованому для всіх інших (рис. 4).

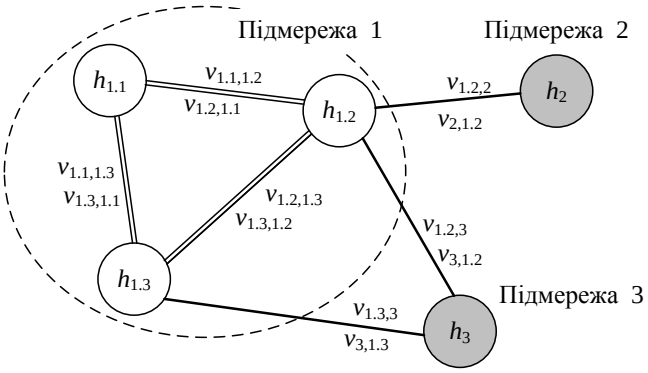


Рис. 4. Топологічна інформація НР

Задача формулюється як оптимізаційна з критерієм оптимальності, аналогічним до (27), та обмеженнями, що пов'язані з динамікою інформаційного обміну як в середині q-ї підмережі, так і з іншими підмережами, виду

$$\vec{x}_q^{нр}(k+1) = \vec{x}_q^{нр}(k) + B_q^{нр}(k)\vec{u}_q^{нр}(k) + \vec{y}_q^{нр}(k), \qquad (32)$$

де $\vec{x}_q^{нр}(k)$ – вектор стану q-ї підмережі; $B_q^{вр}(k)$ – матриця, що містить доступну для даного рівня управління топологічну інформацію; $\vec{y}_q^{нр}(k) = \vec{y}_q^{аб}(k) + \vec{y}_q^{звн}(k)$ – вектор сумарного навантаження на вузли q-ї підмережі, що об'єднує абонентське $\vec{y}_q^{аб}(k)$ і зовнішнє $\vec{y}_q^{звн}(k)$ навантаження; $\vec{u}_q^{нр}(k)$ – вектор управління НР.

На змінні стану та управління відповідно до їх фізичного змісту накладаються обмеження вигляду (29) – (31). З метою забезпечення якості обслуговування в межах задачі НР додатково накладаються *QoS*-обмеження (9) – (14), які отримано за допомогою тензорних моделей ТКС. Результатом розв'язання оптимізаційної задачі НР є вектор управління $\vec{u}_q^{нр}(k)$, який є кінцевим результатом та складає основу для побудови маршрутних таблиць.

Слід зазначити, що використання тензорних моделей ТКС призводить до ускладнення математичного описання, а потім і методів розрахунку та практичної реалізації, що відбивається в результаті на масштабованості отримуваних рішень. З метою її підвищення у **п'ятому розділі** викладено загальну методику застосування діакоптики Г. Крона до тензорних моделей ТКС, згідно з якою основними етапами діакоптичного узагальнення є:

1. Декомпозиція топологічної моделі мережі S, виділення N основних підмереж та $(N+1)$-ї мережі, так званого ланцюга перетинів (утворюється з гілок, через які проходить лінія декомпозиції).

2. Подання кожної з підмереж S_i в еквівалентному вигляді $S_i^{екв}$, що формалізується як перехід для кожної з них від базису гілок $\mathcal{G}_v^{(i)}$ розмірності n_i до базису $\mathcal{G}_x^{(i)екв}$ розмірності $n_i^{екв} \le n_i$, де $\mathcal{G}_x^{(i)екв}$ може бути, наприклад, базисом шляхів $\mathcal{G}_\gamma^{(i)}$ (рис. 5) або вузлових пар $\mathcal{G}_\eta^{(i)}$.

3. Розрахунок проекції метричного тензору сукупності розрізнених та поданих в еквівалентному вигляді підмереж $S_i^{екв}$, наприклад, проекції G_γ^{dec} тензора $\mathbf{G}$, яка є блочно-діагональною матрицею, на головній діагоналі якої знаходяться проекції $G_\gamma^{(i)}$ для окремих підмереж, $i = \overline{1, N+1}$.

4. З'єднання сукупності еквівалентних підмереж в єдину мережу та визначення для неї метричного тензора, наприклад, $G_{\gamma\varepsilon}^{com} = \left(A_{\gamma\ dec}^{\langle\gamma\varepsilon\rangle\ com} \right)^t G_\gamma^{dec} A_{\gamma\ dec}^{\langle\gamma\varepsilon\rangle\ com}$, де $A_{\gamma\ dec}^{\langle\gamma\varepsilon\rangle\ com}$ – матриця коваріантного координатного перетворення при переході від базису з'єднаної мережі до базису декомпозиційованої мережі $\mathcal{G}_\gamma^{dec} \leftarrow \mathcal{G}_{\langle\gamma\varepsilon\rangle}^{com}$.

Проекції метричних тензорів для з'єднаної мережі S^{com} містять в собі інформацію про метричні властивості (алгоритми обслуговування, характеристики трафіка та ін.) вихідної мережі S та є еквівалентами до проекцій її метричних тензорів.

Відповідно до методики діакоптичного узагальнення розроблено діакоптичну тензорну модель ТКС, яка була конкретизована для різних типів еквівалентного подання підмереж: через сукупність шляхів ($\mathcal{G}_\gamma^{(i)}$), розрізів ($\mathcal{G}_\omega^{(i)}$) і вузлових пар ($\mathcal{G}_\eta^{(i)}$). У межах діакоптичної тензорної моделі ТКС з використанням різних типів еквівалентного подання підмереж було формалізовано умови забезпечення якості обслуговування «з кінця в кі-

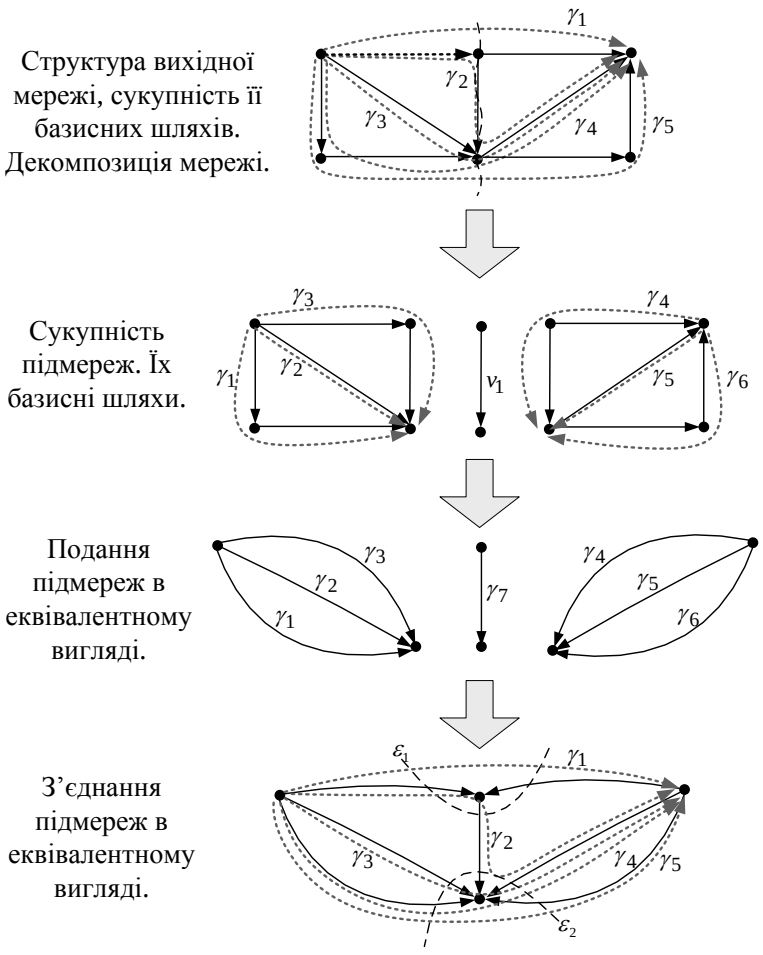


Рис. 5. Перетворення структури в межах діакоптики

нець» (у базисі $\mathcal{G}_{\eta}^{(i)}$), за підмережами ($\mathcal{G}_{\omega}^{(i)}$), за множиною шляхів між парою адресатів ($\mathcal{G}_{\gamma}^{(i)}$), але застосування яких орієнтовано на реалізацію розподілених розрахунків та в результаті сприяє зниженню обчислювальної складності.

Діакоптичну тензорну модель ТКС покладено в основу відповідного дворівневого методу управління трафіком, який передбачає використання більш жорстких умов, отриманих у базисі $\mathcal{G}_{\eta}^{(i)}$, для критичного *QoS*-показника та власне розв'язання задачі управління, а слабкіших умов, отриманих в базисі $\mathcal{G}_{\gamma}^{(i)}$, для перевірки отриманих рішень щодо виконання вимог за менш критичними *QoS*-показниками. Метод передбачає наступні дії.

1. Сервер *sRS* кожної q-ї підмережі, $q=\overline{1,N}$, на основі оцінки поточного стану своєї підмережі формує матриці проекцій її метричних тензорів у різних базисах: проекції $E_{\pi\eta}^{(q)}$ й $\Theta_{\pi\eta}^{(q)}$ тензорів $\mathbf{E}^{(q)}$ і $\mathbf{\Theta}^{(q)}$ в ортогональному базисі $\mathcal{G}_{\langle\pi\eta\rangle}^{(q)}$ розмірності n_q для внутрішніх розрахунків і проекції $E_{\eta}^{(q)}$ й $\Theta_{\eta}^{(q)}$ в однотипному базисі $\mathcal{G}_{\eta}^{(q)}$ розмірності $n_q^{екв}=\phi_q$ для передачі на ВР; а також проекцій $G_{\gamma}^{(q)}$ і $X_{\gamma}^{(q)}$ тензорів $\mathbf{G}^{(q)}$ і $\mathbf{X}^{(q)}$ в базисі $\mathcal{G}_{\gamma}^{(q)}$ для передачі на ВР.

2. Кожний q-й *sRS* передає до *RS* узагальнені метрики своєї підмережі розмірності $n_i^{екв}$, метрики трактів передачі, що належать ланцюгу перетинань, але знаходяться під управлінням q-го *sRS*, а також вимоги зовнішніх запитів на обслуговування, включаючи необхідну інтенсивність передачі $\lambda^{\langle вим\rangle}$, припустимі значення $\tau_{\langle вим\rangle}$ й $p_{\langle вим\rangle}$ із зазначенням найбільш критичного показника.

3. *RS* на основі окремих метрик формує метрики з'єднаної мережі $E_{\pi\eta}^{com}$, $\Theta_{\pi\eta}^{com}$, $X_{\gamma\varepsilon}^{com}$, $G_{\gamma\varepsilon}^{com}$, тобто визначає проекції метричних тензорів у базисах $\mathcal{G}_{\langle\pi\eta\rangle}^{com}$ для розрахунків і $\mathcal{G}_{\langle\gamma\varepsilon\rangle}^{com}$ для перевірки умов забезпечення якості обслуговування.

4. *RS* розв'язує задачу управління трафіком шляхом розрахунку $\Lambda_{\pi\eta}^{com}$.

5. Перетворення отриманого вектора проекції $\Lambda_{\pi\eta}^{com}$ згідно з наступним ланцюжком $\Lambda_{\pi\eta}^{com}\to\Lambda_{\eta}^{dec}\to\Lambda_{\eta}^{(i)}\to\Lambda_{\nu}^{(i)}\to\Lambda_{\gamma}^{(i)}\to\Lambda_{\gamma}^{dec}\to\Lambda_{\gamma\varepsilon}^{com}$.

6. *RS* перевіряє умови забезпечення якості обслуговування за менш критичним *QoS*-показником. У випадку виконання даних умов перехід до п.7. При їхньому невиконанні формується повідомлення або про відмову в обслуговуванні, або про можливість обслуговування з нижчою якістю.

7. *RS* розсилає до *sRS* розраховані вектори інтенсивностей трафіка $\Lambda_v^{(q)}$, включаючи тракти ланцюга перетинань. *sRS* кожної q-ї підмережі трактує елементи вектора $\Lambda_v^{(q)}$, що відносяться до трактів ланцюга перетинань, як розподіл міжмережного трафіка.

8. Знаючи інтенсивності зовнішнього трафіка, їх точки входу і виходу, а також інтенсивності внутрішнього трафіка, сервери *sRS* незалежно один від одного розв'язують задачі розподілу трафіка всередині підмереж.

9. На основі отриманого розподілу сумарного трафіка кожен *sRS* формує й розсилає маршрутні таблиці до всіх вузлів своєї підмережі.

10. Перехід до п. 1

В цілому діакоптичний метод управління трафіком успадковує основні властивості тензорних моделей: багатошляховий спосіб маршрутизації, відсутність циклів у маршрутах, досягнення заданих *QoS*-вимог, але при цьому забезпечує масштабованість рішень щодо управління трафіком, оскільки вони формуються на основі безітераційного об’єднання результатів розрахунків для окремих підмереж та можуть бути отримані в аналітичному вигляді.

В **шостому розділі** відображено результати комплексного дослідження запропонованих у роботі математичних моделей ТКС і методів управління трафіком із залученням засобів аналітичного (*Matlab*) й імітаційного (пакет *TOTEM*) моделювання, а також лабораторного експерименту на мережному обладнанні компанії *Cisco Systems*.

Отримані результати продемонстрували адекватність запропонованої тензорної [*NP, πω*]-моделі ТКС: розбіжність між результатами аналітичних розрахунків і експериментально отриманими значеннями основних показників якості обслуговування не перевищувала в середньому 5 – 7 % для середнього часу затримки в мережі й 4 – 9% для ймовірності доставки пакетів.

Установлено, що застосування [*NP, πω*]-моделі для розв'язання задач управління трафіком забезпечує підвищення продуктивності мережі в середньому на 10 – 20%, а також покращення якості обслуговування за середньою затримкою на 30 – 40%, за ймовірністю доставки пакетів на 5 – 8% у порівнянні з іншими багатошляховими стратегіями управління трафіком за тих же обсягів вільних ресурсів і вимогах трафіка до *QoS* (рис. 6), де М1 – М4 – потокові моделі ТКС, у межах яких задача управління сформульована як задача лінійного програмування з вартісною цільовою функцією (М1); задача квадратичного програмування (М2); задача *Traffic engineering*, формалізована у вигляді задачі мінімізації максимального коефіцієнта використання всіх ТП (М3); задача лінійного програмування з обмеженням на використання канальних ресурсів (М4). У межах [*NP, πω*]-моделі, як демонструють результати експерименту, різниця між середнім $K_{av}^{вик}$ і максимальним $K_{\max}^{вик}$ коефіцієнтами використання канальних ресурсів не перевищує 0,2, що свідчить про збалансоване розподілення мережних ресурсів. Крім того дана модель продемонструвала робастність стосовно коливань $\Delta\Lambda$ інтенсивності надходження трафіка (при $\Delta\Lambda \le 20\ldots25\%$).

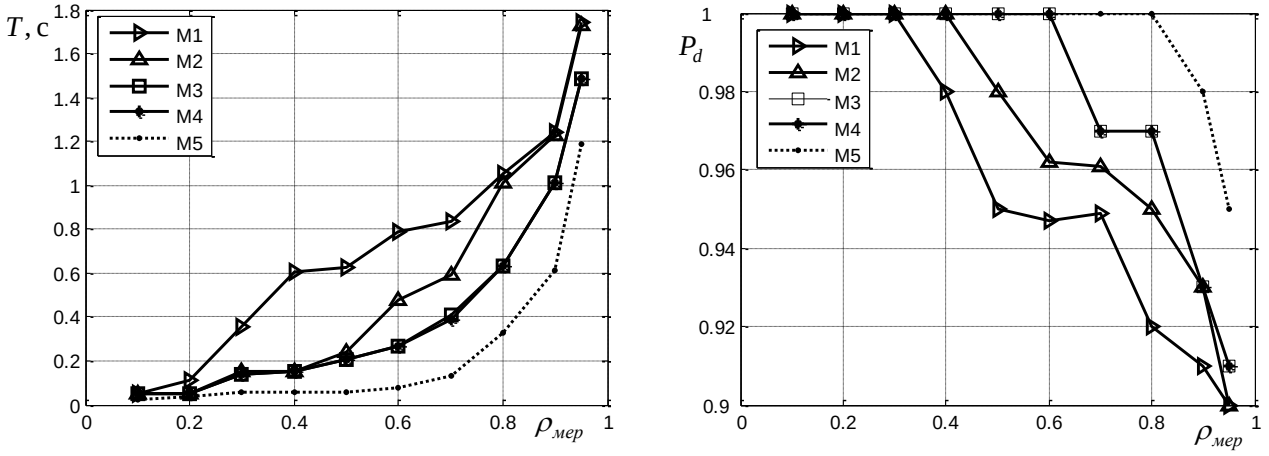
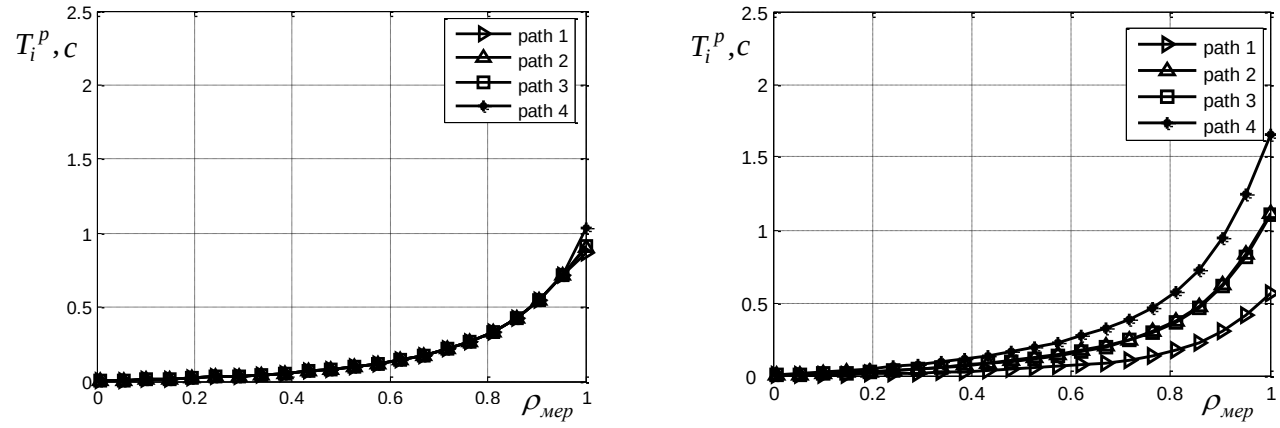


Рис. 6. Результати лабораторного дослідження тензорної [*NP*, $\pi\omega$]-моделі ТКС (М5) у порівнянні з іншими потоковими моделями ТКС (М1) – (М4)

Встановлено, що підвищення якості обслуговування й продуктивності мережі при використанні тензорної [*NP*, $\pi\omega$]-моделі в порівнянні з відомими рішеннями відбувається не за рахунок збалансованого використання мережних ресурсів, а завдяки рівності основних показників якості за множиною доступних маршрутів (балансування за якістю обслуговування) (рис. 7). Причому переваги тензорних моделей проявляються найбільшою мірою в умовах мереж з високою зв'язністю (кількість незалежних шляхів 4 і більше) і при високих вхідних навантаженнях $\rho_м \geq 0{,}6$.



а) б)

Рис. 7. Середня затримка в окремих маршрутах для тензорної [*NP*, $\pi\omega$]-моделі (а) та моделі М3

Показано, що використання оцінок кінцевих користувачів *QoE* під час розв'язання задач управління трафіком сприяє підвищенню продуктивності мережі в цілому. Підвищення продуктивності мережі за рахунок використання тензорної моделі *QoE*-класу найбільшою мірою проявляється у випадку трафіка з високими вимогами до якості обслуговування ($R > 80$), складає у середньому 5 – 7% відносно [*NP*, $\pi\omega$]-моделі й спостерігається в умовах високих навантажень, коли під час використання моделей *NP*-класу задовольнити *QoS*-вимоги не є

можливим. Завдяки використанню оцінок *QoE* в процесі управління трафіком забезпечується можливість динамічно перерозподіляти вимоги до показників *NP* (наприклад, для мовного трафіка збільшити припустиму середню затримку з 150 до 200 мс, але зменшити припустимий рівень втрат пакетів, з 3 до 2%) так, щоб результуюча якість на рівні *QoE* задовольняла користувачів (на рис. 8 оцінка *R*=83).

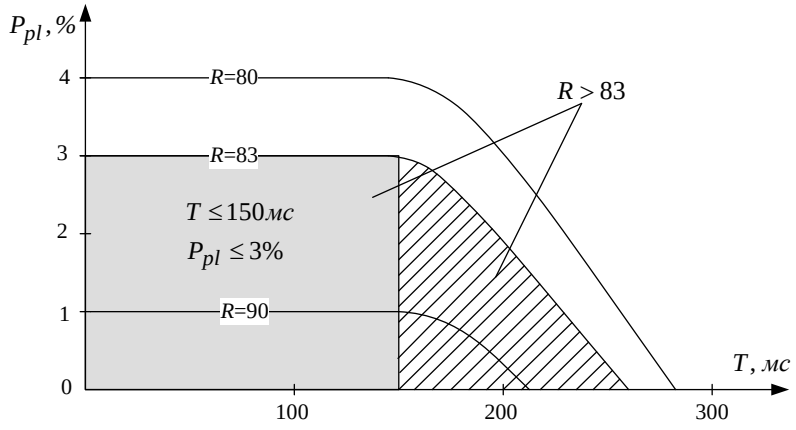


Рис. 8. Розширення області припустимих значень на площині T - P_{pl}

З метою оцінки ефективності управління в межах запропонованих ієрархічних методів проведено їхнє дослідження із залученням результатів аналітичних розрахунків (*Matlab*) й імітаційного моделювання (пакет *TOTEM*). Показано що запропоновані методи забезпечують зниження обсягів службового трафіка й час прийняття рішення, як мінімум, в 2 – 3 рази, а в середньому 4 – 6 разів у порівнянні з раніше відомими ієрархічно-координаційними методами маршрутизації. Це досягалося за рахунок того, що раніше відомі методи забезпечують отримання оптимального рішення шляхом ітераційних процедур, а в межах запропонованих методів рішення досягається безітераційно.

Виявлено, що запропонований дворівневий метод маршрутизації з підтримкою якості обслуговування в багатооператорських мережах забезпечує підвищення продуктивності таких мереж відносно протоколу *BGP* у середньому на 20 – 27% (при $\rho_м$=0,6…0,8) і на 15 – 20% щодо інших ієрархічно-координаційних методів маршрутизації. Областю використання даного методу є багатооператорські мережі з високим ступенем міжмережної зв’язності, які функціонують в умовах високої завантаженості як підмереж, так і мережі в цілому ($\rho_м \ge 0{,}6$).

Застосування запропонованого методу адаптивного управління трафіком в ієрархічній ТКС, що перебуває під єдиним адміністративним керуванням, забезпечує підвищення продуктивності на величину 20-30% у порівнянні з існуючими протокольними рішеннями за рахунок введення тензорних *QoS*-обмежень та усунення невизначеностей відносно характеристик абонентського навантаження під час розв'язання задачі їх ідентифікації. Виявлено, що втрати продуктивності $\Delta P_{аб}$ суттєво залежать від погрішності $\Delta y^{аб}$ в оцінюванні обсягів абонентського навантаження, завантаженості мережі й інтервалу перерозрахунку Δt змінних управління (рис. 9).

Управління трафіком відповідно до запропонованого діакоптичного методу, як показали результати імітаційного моделювання, забезпечує покращення якості обслуговування, наприклад, зменшення середньої затримки, у порівнянні з раніше відомими рішеннями на величину 30 – 40% за рахунок тензорного характеру моделі. Запропоновано, за використання постійних метрик мережі в межах діакоптичного методу управління трафіком ввести градації метрик: для низкої, середньої й високої завантаженості мережі.

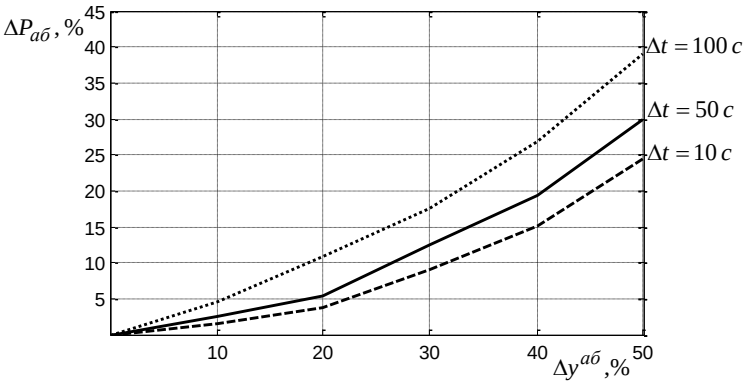


Рис. 9. Залежність втрат продуктивності $\Delta P_{аб}(\Delta y^{аб})$ через погрішності в оцінюванні обсягів абонентського навантаження

На основі результатів дослідження розроблених моделей і методів управління трафіком запропоновано науково-методичні рекомендації з їхнього використання в сучасних і перспективних пакетних мережах з підтримкою гарантованої якості обслуговування одночасно за швидкісними, часовими *QoS*-показниками і показниками надійності. Показано, що запропоновані методи повністю укладаються в архітектуру управління мережами *NGN* на основі потоку *FSA* і дозволяють організувати всі типи визначених рекомендаціями *ITU-T* послуг (з резервуванням і без резервування ресурсів).

ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-прикладну проблему, яка полягає в розробці теоретичних основ забезпечення якості обслуговування при реалізації динамічних і багатошляхових стратегій управління трафіком у мультисервісних телекомунікаційних системах на основі їх динамічних моделей у просторі станів, діакоптичних і тензорних моделей. За підсумками вирішення поставленої проблеми можна зробити такі висновки:

1. Встановлено, що центральне місце у функціональній архітектурі сучасної ТКС, яка побудована відповідно до концепції *NGN* і невід'ємним атрибутом якої є надання послуг із гарантованою якістю обслуговування, займають функції управління *RACF*. На основі аналізу існуючих протоколів і перспективних концепцій сформульовано вимоги до методів управління трафіком у сучасних ТКС, серед яких урахування мультисервісності, підтримка *QoS* одночасно за декількома показниками, збалансоване використання мережних ресурсів, узгоджене розв'язання задач маршрутизації, управління доступом і резервування ресурсів, масштабованість та ін., що у сукупності вимагає системного підходу до розв'язання задач управління.

2. Аналіз існуючих технологічних та теоретичних рішень щодо управління трафіком з підтримкою *QoS* вказав на необхідність перегляду покладених в їх

основу математичних моделей в напрямку підвищення системності. З позицій висунутих вимог до управління трафіком проведено аналіз існуючих підходів до математичного моделювання ТКС, який показав, що перспективним способом управління трафіком в *NGN* є стратегія *AMMO* в комбінації з описанням динаміки ТКС у просторі станів. Такий перехід від евристичних схем і статичних моделей до динамічного опису є необхідною умовою покращення якості синтезованого управління й підвищення ефективності функціонування системи в цілому. Показано, що подальший розвиток математичного моделювання ТКС з підтримкою *QoS* пов'язаний із застосуванням тензорних моделей, які поєднують у собі структурне і функціональне описання ТКС.

4. На основі аналізу відомих результатів сформульовано основні етапи тензорного моделювання ТКС і визначено можливі шляхи розвитку тензорних моделей, серед яких основними є введення нових типів просторів і систем координат, розширення переліку використовуваних метрик, розширення переліку мережних параметрів, що мають тензорну природу, перехід до мультитензорної інтерпретації математичних моделей ТКС, використання тензорних полів для описання динаміки ТКС, а також застосування діакоптики як засобу підвищення масштабованості отримуваних рішень.

5. З метою тензорного моделювання багатооператорських ТКС з нормуванням показників якості обслуговування в роботі розширено перелік координатних систем шляхом уведення нової ортогональної СК контурів і розрізів мережі, яка є узагальненням раніше відомої СК контурів і вузлових пар. Запропоноване рішення дозволяє оперувати нормованими показниками якості обслуговування, тобто показниками в межах окремих підмереж (дільниць однієї мережі, мереж різних операторів або доменів управління). Для диференціації показників якості обслуговування за множиною шляхів передачі трафіка, що важливо для передачі різнопріоритетних потоків, у роботі запропоновано ортогональну СК шляхів і внутрішніх розрізів мережі, яка є узагальненням раніше відомої СК шляхів і внутрішніх вузлових пар. Для розв'язання задач багатоадресного та широкомовного розсилання запропоновано неортогональну СК дерев.

6. З метою врахування самоподібного характеру мережного трафіка, пріоритетності і багатоканальності обслуговування, обмеженості буферного ресурсу в роботі запропоновано нові метрики, які вводяться в ході тензорного узагальнення математичних моделей ТКС, та які визначають метричні властивості простору, що пов'язаний з даною ТКС. Це дозволило, по-перше, підвищити адекватність опису процесу управління в межах тензорних моделей, по-друге, розширити перелік розв'язуваних мережних задач за рахунок більш повного урахування характеристик трафіка й функціональних особливостей мережі.

7. Запропоновано тензорну [*NP, πω*]-модель ТКС, яка заснована на використанні системи координат контурів і розрізів мережі, що дозволило в умовах багатооператорських мереж оперувати не тільки міжкінцевими *QoS*-показниками, але й показниками в межах окремих *ISP* (*QoS-ISP*), що відповідає вимогам рекомендації Y.1542. Застосування [*NP, πω*]-моделі ТКС забезпечує розв’язання задачі управління трафіком з нормуванням основних по-

казників якості обслуговування (середньої затримки, джитера, рівня втрат пакетів) у багатооператорських мережах. За результатами лабораторного експерименту встановлено, що за рахунок використання тензорної [*NP, πω*]-моделі вдається підвищити продуктивність мережі у середньому на 10 – 20%, знизити середню затримку передачі на 30 – 40% і підвищити імовірність доставки пакетів на 5 – 8% у порівнянні з іншими багатошляховими стратегіями управління трафіком. Областю її переважного застосування є мережі з високою зв'язністю (кількість незалежних шляхів 4 і більше), що функціонують в умовах високих навантажень ($\rho_м \geq 0{,}6$).

8. У напрямку гарантованого забезпечення якості обслуговування за оцінками кінцевих користувачів в роботі вперше запропоновано тензорну модель ТКС *QoE*-класу. Згідно до рекомендацій *ITU-T* G.107, G.1070, G.1030 оцінки *QoE* є функціями міжкінцевих показників якості функціонування мережі, що дозволило в процесі управління трафіком динамічно перерозподіляти вимоги до показників *NP* (наприклад, збільшити припустиму середню затримку, але зменшити припустимий рівень втрат пакетів) так, щоб результуюча якість на рівні *QoE* задовольняла користувачів. Це дозволило реалізувати більш гнучке і повне урахування особливостей підтримки якості обслуговування для мовного трафіка, трафіків відеоконференцій і перегляду інформації в *Web*. Як показали результати моделювання, застосування тензорної моделі *QoE*-класу забезпечує додаткове підвищення продуктивності мережі відносно [*NP, πω*]-моделі на 5 – 7% особливо для трафіка з високими вимогами щодо якості обслуговування ($R > 80$) та в умовах високого навантаження, коли за використання моделей *NP*-класу задовольнити *QoS*-вимоги не вбачається можливим.

9. Встановлено, що в умовах забезпечення якості обслуговування трафіка за декількома *QoS*-показниками, серед яких можна чітко виділити якийсь один найбільш критичний для даного типу трафіка (наприклад, затримку для мовного трафіка), перехід від двобазисних тензорних моделей до трибазисних сприяє подальшому підвищенню продуктивності ТКС. У зв'язку з цим в роботі запропоновану трибазисну тензорну [*NP, πη-γε*]-модель ТКС, яка дозволяє більш гнучко формувати *QoS*-обмеження для різних показників якості обслуговування відповідно до їхньої критичності для даного типу трафіка. Запропонована модель базується на одночасному використанні трьох систем координат: СК контурів і вузлових пар мережі разом з СК гілок для формування обмежень за найбільш критичним показником якості обслуговування, а СК шляхів і внутрішніх розрізів разом з СК гілок – для інших менш критичних *QoS*-показників.

10. З метою зниження обчислювальної складності практичної реалізації запропонованих в роботі тензорних моделей без суттєвого зниження точності отримуваних рішень були вперше отримані умови використання в їх межах афінних систем координат замість криволінійних шляхом апроксимації метричного тензора постійним числом. Це означає отримання розв'язку мережної задачі в аналітичному вигляді (за умови афінних систем координат) замість застосування числових процедур пошуку (за умови криволінійних систем координат). Установлено, що основними факторами, які визначають адекватність

таких дій, є структура доступних шляхів між заданою парою адресатів, їх пропускні здатності й поточний ступінь завантаження мережі. В цілому апроксимація метрик є припустимою (з розбіжністю до 5%) у випадках, коли всі доступні для передачі шляхи однакові як за пропускними здатностями, так і за кількістю переприйомів; коли обсяги вільних ресурсів дорівнюють подвоєному обсягу трафіка, що надходить (геодезична крива); коли сумарна завантаженість мережі близька до $\rho_м \approx 0{,}5$.

11. У роботі набув подальшого розвитку дворівневий метод управління трафіком з підтримкою *QoS* в багатооператорських мережах, в якому рішення про міжмережні маршрути приймається на основі встановленої між провайдерами угоди про порядок обробки транзитного трафіка та зафіксованих в *SLS* показників якості обслуговування, що гарантуються в мережі кожного провайдера. У межах запропонованого методу задача міжмережного управління сформульована як задача математичного програмування, у якій з метою підвищення масштабованості передбачається оперування агрегованими трафіками, а як вихідні дані використовується агрегована топологічна інформація (у вигляді *SLS*-топології). У цілому метод при розрахунках маршруту відповідає підходу «накопичення похибок» (Y.1542). Управління трафіком усередині підмереж організовано відповідно до концепції сервера маршрутів і багатошляхової динамічної маршрутизації, яка формалізована як задача оптимального управління в межах моделі ТКС у просторі станів. У цілому метод може бути класифікований як метод ієрархічної багатошляхової маршрутизації, головною перевагою якого є безітераційне визначення міжмережного маршруту, що відповідає міжкінцевим *QoS*-вимогам, разом з узгодженим розв’язанням задач маршрутизації, управління доступом і резервування ресурсів.

12. Для територіально-розподілених мереж, що знаходяться під єдиним адміністративним керуванням, в роботі набув подальшого розвитку дворівневий метод адаптивного управління трафіком, який базується на використанні декомпозиційного принципу послідовної координації й ідей адаптивного управління. Властивостями методу є: 1) допущення невизначеностей відносно характеристик абонентського навантаження, які усуваються під час розв'язання задачі ідентифікації; 2) введення сервера маршрутів мережі, на який покладаються функції координації дій підмереж, формалізовані у вигляді задачі адаптації другого рівня, за рахунок чого досягається узгоджене управління в межах окремих підмереж; 3) висока масштабованість, яка забезпечується за рахунок декомпозиційного розв'язання вихідної задачі, використання агрегованої топологічної інформації під час розв'язання задачі управління верхнього рівня та однієї ітерації в процесі взаємодії серверів маршрутів різних рівнів.

13. З метою розширення області застосування тензорних моделей у роботі вперше запропоновано діакоптичну тензорну модель територіально-розподіленої гетерогенної ТКС, засновану на декомпозиційному поданні структури мережі й використанні принципів діакоптики. У межах діакоптичної моделі технологічна різнорідність підмереж визначала типи метричних просторів, що вводяться для описання підмереж в ході геометризації їх структурно-

функціонального подання. Простір, що пов'язується з ТКС у цілому, утворюється шляхом об'єднання просторів підмереж. На основі запропонованої діакоптичної моделі отримано умови забезпечення якості обслуговування «з кінця в кінець», за підмережами, з диференціацією *QoS*-показників за множиною доступних шляхів, що досягається за рахунок використання різних типів базисів та реалізації різних способів еквівалентного подання підмереж.

14. На основі розробленої діакоптичної тензорної моделі в роботі вперше запропоновано метод управління трафіком у гетерогенній ТКС з підтримкою *QoS*, в якому результуюче рішення щодо управління трафіком у мережі формується на основі безітераційного об’єднання результатів розрахунків для окремих підмереж та може бути отримано в аналітичному вигляді. Висока масштабованість управління в межах запропонованого методу забезпечується за рахунок реалізації ієрархічного управління та низької інерційності процесу формування рішення завдяки зниженню обсягів службового навантаження, обумовлених кількістю ітерацій у взаємодії серверів управління різних рівнів.

15. Адекватність тензорних моделей ТКС і ефективність управління, побудованого на їхній основі, були підтверджені результатами аналітичного (з використанням *Matlab*), імітаційного (з використанням пакета *TOTEM*) моделювання і лабораторного експерименту (з використанням обладнання *Cisco Systems*). Так для тензорних моделей розбіжність між результатами лабораторного експерименту та аналітичних розрахунків складала в середньому 4 – 9%. На користь адекватності запропонованих тензорних моделей свідчить ще й те, що отримані за їх допомогою рішення не суперечили раніше відомим результатам.

16. Результати експериментального дослідження показали, що під час розв'язання задач управління трафіком у мережі з гарантованою якістю обслуговування умова збалансованого використання мережних ресурсів не є достатньою, «сильнішою» є вимога рівності основних показників якості по множині доступних маршрутів (балансування за якістю обслуговування). Причому доцільно дану вимогу застосовувати не до всіх, а тільки до одного, найбільш критичного *QoS*-показника.

17. Встановлено, що областю використання запропонованих тензорних моделей та ієрархічних методів управління трафіком є сучасні й перспективні пакетні мережі з підтримкою гарантованої якості обслуговування одночасно за швидкісними, часовими *QoS*-показниками та показниками надійності особливо в умовах високої завантаженості як підмереж, так і мережі в цілому (0,6 і вище). Використання запропонованих методів управління трафіком дозволяє підвищити продуктивність в середньому 20 – 30% залежно від структури мережі, її завантаженості та вимог щодо якості обслуговування.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Евсеева О.Ю. Потоковая модель процесса маршрутизации с гарантированным качеством обслуживания / О.Ю. Евсеева, А.В. Лемешко, А.А. Кравчук // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2004. – Вып. 138. – С. 32 – 37.

2. Беленков А.Г. Метод распределения нагрузки в иерархических телекоммуникационных сетях на базе декомпозиционных принципов предсказания взаимодействий и целевой координации / А.Г. Беленков, О.Ю. Евсеева, А.В. Лемешко // Праці УНДІРТ. – 2005. – №2(42). – С. 11 – 16.

3. Евсеева О.Ю. Распределение нагрузки в иерархических телекоммуникационных сетях декомпозиционным методом / О.Ю. Евсеева, А.Г. Беленков, С.В. Алексеев // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2005. – Вып. 142. – С. 63 – 70.

4. Лемешко А.В. Методика выбора независимых путей с определением их количества при решении задач многопутевой маршрутизации / А.В. Лемешко, О.Ю. Евсеева, О.А. Дробот // Праці УНДІРТ. – 2006. – Вип. №4 (48). – С. 69–73.

5. Лемешко А.В. Игровая трактовка задачи иерархическо-координационной маршрутизации в территориально-распределенной телекоммуникационной системе / А.В. Лемешко, О.Ю. Евсеева, Д.В.Симоненко // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2006. – Вып. 144. – С. 251 – 257.

6. Лемешко А.В. Реструктуризация телекоммуникационной системы в условиях неопределенности ее стационарного состояния / А.В. Лемешко, О.Ю. Евсеева, О.В. Копейка [и др.] // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2007. – Вып. 148. – С. 15 – 27.

7. Лемешко А.В. Модифицированный метод целевой координации задач управления сетевыми ресурсами в территориально-распределенных телекоммуникационных системах / А.В. Лемешко, О.Ю. Евсеева, Д.В. Симоненко // Наукові записки УНДІЗ. – 2007 – №2 – С. 22 – 32.

8. Евсеева О.Ю. Мультиструктурная модель и метод управления в самоорганизующейся телекоммуникационной сети / О.Ю. Евсеева // Радиотехника: Всеукр. межведомств. науч.-техн. сб. – 2007. – Вып. 151. – С. 98 – 105.

9. Лемешко О.В. Управління телекомунікаційною системою, що самоорганізується, в умовах невизначеності її стаціонарного стану / О.В. Лемешко, О.Ю. Євсєєва, О.В. Старкова // Моделювання та інформаційні технології: зб. наук. праць. – 2007. – Вип. 42 – С. 142 – 150.

10. Евсеева О.Ю. Метод координации управления сетевыми ресурсами, основанный на анализе устойчивости иерархических телекоммуникационных систем / О.Ю. Евсеева, Д.В.Симоненко, Е.В. Старкова // Вісник ДУІКТ. – 2008. – Том 6(2). – С. 170 – 177.

11. Лемешко А.В. Категориально-тензорное представление телекоммуникационной системы / А.В. Лемешко, О.Ю. Евсеева, А.В. Чечуй // Наукові записки УНДІЗ. – 2008. – №2(4). – С. 3 – 15.

12. Евсеева О.Ю. Тензорная модель гарантированного обеспечения нормированных показателей качества обслуживания в ТКС / О.Ю. Евсеева // Наукові записки УНДІЗ. – 2008. – №3(5). – С. 71 – 81.

13. Лемешко О.В. Модель динамічного балансування мережних ресурсів у телекомунікаційній мережі / О.В.Лемешко, О.Ю. Євсєєва, Д.В. Симоненко // Системи обробки інформації. – 2008. – Вип.5 (72). – С. 71 – 74.

14. Лемешко А.В. Метод иерархического управления ресурсами телекомму-

никационной сети с апериодической координацией по условиям обеспечения качества обслуживания / А.В. Лемешко, О.Ю. Евсеева, Д.В.Симоненко [и др.] // Радиотехника: Всеукр. межведомств. науч.-техн. сб. – 2008. – Вып. 154. – С. 156 –166.

15. Євсєєва О.Ю. Метод секвенційного управління мережними ресурсами в розподілених ієрархічних телекомунікаційних мережах / О.Ю. Євсєєва // Моделювання та інформаційні технології: зб. наук. праць. – 2008. – Вип. 49. – С. 226 – 233.

16. Евсеева О.Ю. Обеспечение гарантированного качества обслуживания в сетях NGN с использованием оценок конечных пользователей / О.Ю. Евсеева // Радиотехника: Всеукр. межведомств. науч.-техн. сб. – 2008. – Вып. 155. – С. 54 – 71.

17. Евсеева О.Ю. Метод адаптивного управления сетевыми ресурсами в условиях неопределенности характеристик трафика / О.Ю. Евсеева // Радиотехника: Всеукр. межведомств. науч.-техн. сб. – 2009. – Вып. 156. – С. 20 – 27.

18. Поповский В.В. Динамическое управление ресурсами ТКС: математические модели в пространстве состояний / В.В. Поповский, А.В. Лемешко, О.Ю. Евсеева // Наукові записки УНДІЗ. – 2009. – №1(9). – С. 3 – 26.

19. Евсеева О.Ю. Метод адаптивного управления ресурсами иерархической телекоммуникационной сети / О.Ю. Евсеева // Прикладная радиоэлектроника. – 2009. – Том 8, № 2. – С. 162 – 172.

20. Евсеева О.Ю. Исследование метрических свойств тензорных моделей при решении сетевых задач / О.Ю. Евсеева // Моделювання та інформаційні технології: зб. наук. праць. – 2009. – Вип. 54. – С. 81 – 94.

21. Евсеева О.Ю. Классификация пространств и базисов, используемых при геометрическом описании структуры телекоммуникационной сети / О.Ю. Евсеева // Радиотехника: Всеукр. межведомств. науч.-техн. сб. – 2009. – Вып. 159. – С. 14 – 19.

22. Лемешко А.В. Тензорная геометризация структурно-функционального представления телекоммуникационной системы в базисе межполюсных путей и внутренних разрезов / А.В. Лемешко, О.Ю. Евсеева // Наукові записки УНДІЗ. – 2010. – Вип. 1(13). – С. 14-26.

23. Евсеева О.Ю. Диакоптическое обобщение тензорной модели телекоммуникационной сети / О.Ю. Евсеева // Системи обробки інформації. – 2010. – Вип. 2(83). – С. 84 – 91.

24. Лемешко А.В. Двухуровневый метод маршрутизации с поддержкой качества обслуживания в многооператорских сетях NGN / А.В. Лемешко, О.Ю. Евсеева, Д.В. Агеев // Збірник наукових праць Харківського університету повітряних сил. – 2010. – Вип. 1 (23). – С. 83 – 89.

25. Поповский В.В. Тензорная модель адаптивной фрагментации (дефрагментации) пакетов в транзитных узлах телекоммуникационной сети при решении задач многопутевой маршрутизации / В.В. Поповский, А.В. Лемешко, О.Ю. Евсеева // Теория и техника передачи, приема и обработки информации: 10-я Междунар. конф.: тезисы докл. – Харьков: ХНУРЭ, 2004. – С. 101 – 102.

26. Лемешко А.В. Сравнительный анализ моделей многопутевой маршрутизации в мультисервисных телекоммуникационных сетях / А.В. Лемешко, О.Ю.

Евсеева, В.Н. Руденко, [и др.] // Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития: 2-й Междунар. радиоэлектронный форум: сб. науч. трудов. Том IV. – Х.: АНПРЭ, ХНУРЭ, 2005. – С. IV-20 – IV. 22.

27. Євсєєва О.Ю. Застосування ієрархічно-координаційних методів для оптимізації управління в територіально-розподілених телекомунікаційних мережах військового призначення / О.Ю. Євсєєва, О.Г. Бєлєнков // Перша науково-технічна конференція Харківського університету Повітряних сил, 16 – 17 лютого 2005 р.: тези доповідей. – Харьков: ХУПС, 2005. – С. 228.

28. Лемешко А.В. Определение количества независимых путей при решении задач многопутевой маршрутизации / А.В. Лемешко, О.Ю. Евсеева // Глобальные информационные системы. Проблемы и тенденции развития: междунар. конф., 3-6 окт. 2006 г.: сб. материалов. – Х.: ХНУРЭ, 2006. – С. 381 – 382.

29. Лемешко О.В. Динамічна модель управління мережними ресурсами при невизначеності стану телекомунікаційних систем / О.В. Лемешко, О.Ю. Євсєєва, О.В. Старкова // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ- 2007: 3-я Междунар. научн.-техн. конф., 16-24 апр. 2007 г.: сб. материалов конференции. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. – С. 35.

30. Гоголева М.А. Модель маршрутизации с обоснованным ограничением количества используемых путей / М.А. Гоголева, С.Н. Горяева, О.Ю.Евсеева // Новые информационные технологии в научных исследованиях и образовании: XII Всерос. науч.-техн. конф.: сб. материалов. – Рязань, 2007. – С. 151 – 153.

31. Евсеева О.Ю. Управление самоорганизующейся ТКС в условиях нестационарной неопределенности ее состояния / О.Ю. Евсеева // Сучасні інформаційні системи. Проблеми та тенденції розвитку: 2-а Міжнар. наук. конф., 2 – 5 окт. 2007 р.: зб. матеріалів конференції. – Х: ХНУРЕ, 2007. – С. 119 – 120.

32. Евсеева О.Ю. Обеспечение устойчивости телекоммуникационных систем в рамках теории катастроф / О.Ю. Евсеева, Е.В. Старкова, Д.В. Симоненко // Перспективные технологии в средствах передачи информации ПТСПИ'2007: VII Междунар. науч.-техн. конф., 10 – 12 окт. 2007 г.: сб. материалов конференции. – Владимир: РОСТ, 2007. – С. 64 – 67.

33. Євсєєва О.Ю. Принципи секвенційного управління в ієрархічних телекомунікаційних мережах / О.Ю. Євсєєва // Сучасні проблеми телекомунікацій: наук.-практ. конф., 29 – 30 жовтня 2008 р.: зб. матеріалів конференції. – Львів, 2008. – С. 33 – 36.

34. Евсеева О.Ю. Модель реструктуризации телекоммуникационной сети в условиях неопределенности ее состояния / О.Ю. Евсеева, Е.В. Старкова, А.Г. Беленков // Радіоелектроніка і молодь в XXI ст.: 11-й Міжнар. молодіжний форум, 10 – 12 апр. 2007 р.: зб. матеріалів форуму, Ч. 1.– Харків: ХНУРЕ, 2007. – С. 102.

35. Євсєєва О.Ю. Координація управління мережними ресурсами на основі аналізу стійкості ієрархічних телекомунікаційних систем / О.Ю.Євсєєва, О.В. Старкова, Д.В. Симоненко // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций РТ-2008: 4-я Междунар. молодежная науч.-техн. конф.: сб. материалов конференции. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2008. – С. 46.

36. Gogolieva M., Flow Based Mathematical Models At Multipath Routing /

Maryna Gogolieva, Oksana Yevsyeyeva // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2008: the international Conference, Feb. 19 – 23, 2008: Proceedings of the Conference. – Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2008. – P. 72.

37. Евсеева О.Ю. Пространства координат и их базисы в тензорном анализе телекоммуникационных сетей / О.Ю. Евсеева // Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития: 3-й Междунар. радиоэлектронный форум, 22 – 24 окт. 2008 г.: сб. науч. трудов., Том II. – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ, 2008. – С. 76 – 79.

38. Евсеева О.Ю. Реализация адаптивного подхода к управлению сетевыми ресурсами в условиях неопределенности характеристик трафика / О.Ю. Евсеева // Перспективные технологии в средствах передачи информации ПТСПИ'2009: VIII Междунар. науч.-техн. конф., 21 – 22 мая 2009 г.: сб. материалов конференции. – Владимир, 2009. – С. 97-101.

39. Yevsyeyeva O. Diakoptical Approach in Telecommunication Engineering / Oksana Yevsyeyeva // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2010: the international Conference, Feb. 23 – 27, 2010: Proceedings of the Conference. – Lviv: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2010. – P. 29.

40. Евсеева О.Ю. Диакоптический подход в тензорном моделировании телекоммуникационных сетей / О.Ю. Евсеева // Наукові технології в телекомунікаціях: III-й Міжнар. наук.-техн. симпозіум, 2 – 5 лютого 2010 р.: зб. тез. – К.: ДУІКТ, 2010. – С.74 – 76.

41. Евсеева О.Ю. Тензорная модель QoE-маршрутизации в IP-сети / О.Ю. Евсеева, К.В. Коробко // Комп'ютерне моделювання в наукоємних технологіях КМНТ-2010: наук.-техн. конф.: зб. наук. праць. – Харків, 2010. – С. 100 – 103.

42. Пат. 49641 Україна, МПК (2009) G06G 3/00. Спосіб керування чергами для забезпечення стійкості TCP-сеансу в умовах лінійної моделі блокування пакетів/ Лемешко А.В., Старкова О.В., Євсєєва О.Ю.; власник Харківський національний університет радіоелектроніки. – № u 2009 09992; заявл. 01.10.2009; опубл. 11.05.2010, Бюл. № 9.