

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

**ЛАВРІВ ОРЕСТ АНДРІЙОВИЧ**



УДК 621.391

**МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ НАДАННЯ ПОСЛУГ В ГЕТЕРОГЕННИХ  
РОЗПОДІЛЕНИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ  
СИСТЕМАХ**

05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Львів – 2018

## Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий консультант:** лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, доктор технічних наук, професор **Климаш Михайло Миколайович**, Національний університет «Львівська політехніка», завідувач кафедри телекомунікацій.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор **Толюпа Сергій Васильович**, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, професор кафедри кібербезпеки та захисту інформації;

доктор технічних наук, професор **Катеринчук Іван Степанович**, Національна академія Державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького, професор кафедри загальнонаукових та інженерних дисциплін;

доктор технічних наук, професор **Жураковський Богдан Юрійович**, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», професор кафедри технічної кібернетики.

Захист дисертації відбудеться “07” вересня 2018 р. о 12<sup>00</sup> год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.10 у Національному університеті “Львівська політехніка” (79013, Львів-13, вул. С. Бандери, 12, ауд. 226 головного навчального корпусу).

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Національного університету “Львівська політехніка” (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий “03” серпня 2018 р.

*Учений секретар спеціалізованої  
вченої ради, д.т.н., доцент*



І.В. Демидов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Дисертація присвячена аспектам структурно-функціонального синтезу в процесі надання послуг у гетерогенних розподілених інформаційно-телекомунікаційних системах з метою покращення метрик якості надання послуг шляхом оптимізації структури та показників ефективності функціонування телекомунікаційної підсистеми, а також підвищення захищеності, відмовостійкості та зниження тривалості відновлення працездатності інформаційної підсистеми.

**Актуальність теми.** Бурхливий розвиток галузі інформаційних технологій сьогодні нерозривно пов'язаний із телекомунікаційними системами, які забезпечують передавання інформації між компонентами розподілених інформаційних сервісів. Оскільки питома вага сервісів, функціонування яких не обмежується фізично єдиною обчислювальною системою, значно переважає частку централізованих сервісів, то роль телекомунікацій набуває особливого значення. Поряд із клієнт-серверними та піринговими архітектурами розподілених інформаційно-телекомунікаційних систем, з'являються Cloud-системи, Fog-системи, а широке розповсюдження технологій Інтернету речей приводить до того, що на телекомунікаційні системи покладається функція підтримки універсального інформаційного простору. Зважаючи на те, що поява і запровадження згаданих технологій стимулює розвиток фактично необмеженої множини сервісів, це потребує нового підходу до управління ресурсами та потоками даних в телекомунікаційній площині. Необхідно враховувати взаємодію сервісів на прикладному рівні, яка формує вимоги до відповідної взаємодії на рівні телекомунікаційної мережі. Для цього слід розробити нові методи та моделі надання послуг в інформаційно-телекомунікаційних системах.

Проблематикою надання послуг в розподілених гетерогенних інформаційно-телекомунікаційних системах займається багато українських та закордонних вчених: питання керування мережами – Беркман Л.Н., Толубко В.Б., Глоба Л.С., Теленик С.Ф., Andriy Luntovskiy, Alexander Schill, Толюпа С.В. та інші; сервісно-адаптовані інформаційно-телекомунікаційні системи вивчають у своїх роботах Ложковський А.Г., Стрихалюк Б.М., Лемешко О.В., Natalia Kryvinska, Christine Strauss, Yu C.Z. тощо; керування ресурсами та структурний синтез мереж досліджують Агеєв Д.В., Воробієнко П.П., Гаркуша С.В., Jo M., Schmidt H., Walter F. Witt, Zhao X., Bloomers J. та інші.

З аналізу праць іноземних та вітчизняних учених за обраною тематикою випливає, що сьогодні існує **протиріччя**, яке полягає у відсутності методів керування ресурсами та потоками даних, які б дали змогу врахувати процеси комунікації між елементами розподілених сервісів на прикладному рівні розподілених гетерогенних інформаційно-телекомунікаційних систем зі збереженням обсягів їх апаратного забезпечення.

Отже, розроблення методів та моделей надання послуг у гетерогенних розподілених інформаційно-телекомунікаційних системах для підвищення якості обслуговування та покращення структурно-функціональних параметрів і

характеристик цих систем з метою узгодження взаємодії сервісного шару та шару передавання даних є актуальною невирішеною на сьогодні **науковою проблемою**.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тематика дисертаційної роботи безпосередньо пов'язана з положеннями Постанови Верховної Ради України про «Концепцію національної інформаційної політики», а також «Концепції конвергенції телефонних мереж і мереж з пакетною комутацією в Україні», «Стратегії розвитку інформаційного суспільства в Україні», Закону України «Про Основні засади розвитку інформаційного суспільства в Україні на 2007-2015 роки». Дисертаційні дослідження виконувались у відповідності до наукового напрямку кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка» – «Інфокомунікаційні системи та мережі», в рамках низки держбюджетних науково-дослідних робіт: «Дослідження та розроблення телекомунікаційних мережних систем для застосувань телематики і телеметрії» (ДБ/КОМ) (2011-2012 рр.), № держреєстрації 0111U001223, «Моделі та структури конвергентних телекомунікаційних мереж на основі CLOUD – технологій» («ДБ/CLOUD») (2013-2014 рр.), № держреєстрації 0113U003184, «Методи побудови та моделі інформаційно-телекомунікаційної інфраструктури на основі SDN-технологій для систем електронного урядування» (ДБ/SDN) (2015-2016), № держреєстрації 0115U000444, «Методи побудови гетерогенних інформаційно-комунікаційних систем для розгортання програмно-конфігурованих мереж 5G подвійного використання» (ДБ/5G) (2017-2018), № держреєстрації 0117U004449, «Розроблення методів адаптивного управління радіочастотним ресурсом у мережах мобільного зв'язку LTE-U для розвитку стандартів 4G/5G в Україні» (ДБ/LTE-U), (2017-2019 рр.), № держреєстрації 0117U007177, а також госпдоговірної тематики ГД № 0489, 2014 р.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертації є покращення значень метрик якості надання послуг шляхом оптимізації структури та показників ефективності функціонування телекомунікаційної підсистеми, а також підвищення захищеності, відмовостійкості та зниження тривалості відновлення працездатності інформаційної підсистеми в розподілених інформаційно-телекомунікаційних системах.

Для досягнення поставленої мети в межах дисертаційних досліджень були сформульовані та розв'язані такі завдання:

1. Аналіз методів побудови та процесів комунікації в сучасних інформаційно-телекомунікаційних системах.
2. Дослідження, систематизація та розроблення методів побудови та моделей гетерогенних розподілених інформаційно-телекомунікаційних систем.
3. Розроблення методів структурно-функціонального синтезу телекомунікаційної підсистеми інформаційно-телекомунікаційних систем.
4. Розроблення методів і дослідження процесів керування конфігурацією та забезпечення катастрофостійкості інформаційної підсистеми інформаційно-телекомунікаційних систем.

5. Розроблення моделей та дослідження процесів надання послуг в гетерогенних інформаційно-комунікаційних системах.

6. Експериментальне дослідження поведінки складної інформаційно-комунікаційної системи за умов зростання попиту на інформаційно-комунікаційні послуги.

**Об'єкт дослідження** – процес надання послуг в гетерогенних розподілених інформаційно-телекомунікаційних системах.

**Предмет дослідження** – методи та моделі надання послуг в гетерогенних розподілених інформаційно-телекомунікаційних системах.

**Методи дослідження.** У процесі наукових досліджень використано методи теорії масового обслуговування, теорії інформації, математичної статистики, методи оптимізації, теорії ймовірностей, математичного та імітаційного моделювання, теорію графів. Для підтвердження теоретичних результатів застосовано експериментальні методи дослідження.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

*Вперше запропоновано:*

1. Метод передавання інформації у процесі надання інформаційно-комунікаційних послуг з урахуванням функцій корисності та параметрів процесу пересилання запиту на інформаційно-комунікаційну послугу, чим досягнуто міжрівневу максимізацію ефективності використання ресурсів інформаційно-телекомунікаційної системи.

2. Метод структурно-функціонального синтезу інформаційно-комунікаційних систем, який враховує процеси керування інформаційними потоками на рівні телекомунікаційної мережі, а також процес різнокласового передавання інформації з класифікацією інформаційно-телекомунікаційних послуг на основі рівнів підписки користувачів та забезпечує можливість оцінювання якості надання послуг у процесі їх доставки кінцевим користувачам.

3. Метод відновлення працездатності інформаційно-телекомунікаційної системи після відмов антропогенного походження на основі представлення інфраструктури у вигляді програмного коду, що дає змогу зменшити тривалість відновлення працездатності у процесі розгортання інфраструктури на базі cloud-сервісів.

4. Модель корпоративного клієнта та модель спільної cloud-інфраструктури системи надання інформаційно-комунікаційних послуг, що відрізняються від відомих програмним узагальненим поданням властивостей об'єктів і які, у сукупності, дають змогу оцінити зміни значень метрик якості надання послуг у процесі навантажувального тестування за умов зростання попиту на інформаційно-комунікаційні послуги.

*Набули подальшого розвитку:*

5. Територіально-залежна модель надання інформаційно-телекомунікаційних послуг, яка, на відміну від відомих, враховує характер та динаміку переміщення користувачів, їх інформаційну активність та дає змогу збалансувати використання ресурсів мережі, мінімізувавши кількість вузьких місць, та підвищити доступність інформаційно-комунікаційних ресурсів.

6. Метод узгодженого проектування фізичної та логічної структур телекомунікаційної мережі, який відрізняється від відомих багатофакторним аналізом альтернативних структур, що дає змогу досягти оптимального планування фізичних ресурсів на основі виконання ітеративного пошуку.

**Практичне значення** одержаних результатів. Основним практичним результатом дисертації є розроблена методика дослідження розподілених гетерогенних інформаційно-телекомунікаційних систем на базі cloud-інфраструктури, що є важливим інструментом у процесі їх проектування та експлуатації та дає змогу у цілому розв'язати проблему гармонізації взаємодії рівнів запропонованої концептуальної структури інформаційно-телекомунікаційних систем із покращенням значень метрик якості обслуговування та оптимальним розподілом ресурсів таких систем. За неможливості використання технологій моделювання поведінки досліджуваних систем, розроблена комплексна методика об'єктно-орієнтованого навантажувального тестування дає змогу отримати основні показники використання інфраструктури та якості сприйняття послуг, які надаються користувачам, за умов впливу зростання абонентського навантаження.

На основі наукових результатів дисертації отримано такі **практичні здобутки**:

1. Із застосуванням розроблених моделі пересилання запиту та територіально-залежної моделі, а також методу балансування навантаження, вдалося знизити кількість втрачених комунікаційних сеансів на 14%, у порівнянні зі звичайним режимом роботи системи.

2. На основі нових моделей корпоративного клієнта інформаційно-комунікаційної системи надання послуг та моделі спільної cloud-інфраструктури у поєднанні з реалізованою логікою роботи досліджуваної системи розроблено методику їх навантажувального тестування, що дає змогу оцінити ефективність використання cloud-інфраструктури та показники якості сприйняття послуг користувачами системи під впливом процесів зростання навантаження та безперервної системної інтеграції.

3. Запропоновано алгоритм автоматичного відновлення cloud-інфраструктури після явищ катастрофічного характеру на основі концепції IaaS (Infrastructure as a Code). Отримані результати підтвердили переваги підходу IaaS для відновлення таких систем після аварій та дали змогу на порядок знизити тривалість післяаварійного відновлення.

4. Запропоновано методику перевірки адекватності моделей програмних компонентів гетерогенних розподілених інформаційно-телекомунікаційних систем, яка дає змогу шляхом аналізу процесу передавання даних встановити відхилення затримки передавання між апаратним вузлом та його програмним аналогом за умови однакового алгоритму їх функціонування. Максимальне відхилення затримки пакетів між досліджуваним програмним та апаратним компонентами знаходиться в межах 0,5 %.

5. Доведено, що балансування навантаження за допомогою інтегрованої системи керування розгортанням інформаційних сервісів дає змогу зменшити тривалість обслуговування запитів у середньому до 3 разів. Показано системний

вплив механізмів балансування навантаження, який полягає у обмеженні мінімального значення затримки обслуговування запитів на послуги. Проведено порівняльне оцінювання затримки, результати якого дають змогу стверджувати, що зростання пропускної здатності каналу у 10 разів приводить до зниження затримки обслуговування запиту у середньому в 2,5 рази, що пояснюється обмеженнями методу балансування навантаження.

Основні результати дисертаційної роботи використано і впроваджено:

– у ТзОВ «Інформконсалт» для покращення якості обслуговування абонентів та зниження тривалості відновлення інформаційно-телекомунікаційної інфраструктури;

– у ТзОВ «Телекомунікаційна компанія» для адаптації якості обслуговування абонентів у інформаційно-телекомунікаційній системі з програмними компонентами;

– у ПП «Цифрові технології» для покращення часових показників функціонування і підвищення захищеності інформаційних сервісів, які підлягають розгортанню у cloud-інфраструктурі;

– у навчальному процесі кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка» для модернізації курсу лекцій з дисципліни «Розподілені сервісні системи та cloud-технології».

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно. У працях, опублікованих у співавторстві, авторові належать: у роботах [1, 5, 6, 7, 13, 15, 16, 17, 40] – теоретичні основи міжрівневої взаємодії у гетерогенних розподілених інформаційно-комунікаційних системах; у роботах [2, 38, 48, 50] – теоретичні основи захисту мереж від впливу мережних атак типу DDoS; у роботах [4, 8, 9, 10, 11, 12, 14, 24, 25, 30, 31, 35, 39, 43, 46, 53, 56] – теоретичні основи та дослідження функціональних аспектів процесу надання послуг у безпроводних інформаційно-телекомунікаційних системах, які лягли в основу територіально-залежної моделі обслуговування; у роботах [3, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 26, 27, 36, 41, 49] – теоретичні основи дослідження властивостей інформаційних потоків у розподілених гетерогенних інформаційно-телекомунікаційних системах та їх впливу на значення метрик якості обслуговування, формулювання оптимізаційних завдань; у роботах [28, 29, 51, 52, 55, 57] – теоретичні аспекти структурно-функціонального синтезу телекомунікаційної складової інформаційно-телекомунікаційних систем; у роботах [34, 37, 54] – теоретичні особливості структурно-функціонального синтезу інформаційної складової інформаційно-телекомунікаційних систем; у роботах [32, 47] – теоретичне обґрунтування процесу пересилання інформаційних потоків у оптичних транспортних системах з адаптацією до типу сервісного навантаження; у роботах [33, 44, 45] – обґрунтування та дослідження надійнісних аспектів функціонування розподілених гетерогенних інформаційно-телекомунікаційних систем; у роботі [42] – приклад імплементації розподіленої гетерогенної інформаційно-телекомунікаційної системи.

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові результати і положення дисертації представлені, доповідались та обговорені на 22-х

міжнародних і всеукраїнських науково-технічних конференціях та наукових семінарах: Міжнародних науково-технічних конференціях «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії» (м. Львів-Славське, 2012, 2014, 2016, 2018 pp.); Міжнародних науково-технічних конференціях «Досвід розробки та застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці». (м. Львів-Поляна, 2013, 2015, 2017 pp.); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми телекомунікацій - 2016» ПТ-16 (м. Київ, 2016 pp.); International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (м. Харків, 2014, 2015, 2016); International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (м. Львів, 2015, 2017); 2017 IEEE 1st Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON 2017 (м. Київ, 2017 p.); Науково-практичних конференціях «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2012, 2013, 2014» (м. Львів, 2012, 2013, 2014 pp.); XIII Міжнародній науково-технічній конференції «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах» (м. Одеса, 2014); Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo), 2013 23rd International Crimean Conference (м. Севастополь, Україна, 2013 p.); Міжнародній конференції з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки IEEE (UkrMiCo'2016/UkrMiCo'2016) (м. Київ, 2016 p.); VI Міжнародному науково-технічному симпозиумі «Нові технології в телекомунікаціях» (Вишків, 2013 p.); Сучасні інформаційно-комунікаційні технології COMINFO'2012 (Ялта-Лівадія, Україна, 2012 p.); «Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах» (Чернівці, 2016 p.). Крім цього, дисертаційна робота у повному обсязі представлена на наукових семінарах кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка».

**Публікації.** За результатами досліджень, які викладені у дисертаційній роботі, опубліковано 57 наукових праць, серед них статей у іноземних періодичних виданнях – 6, статей у наукових фахових виданнях України – 17 (з них 13 статей – у науковій періодиці, що входить до міжнародних наукометричних баз різного рівня), статей у наукових виданнях України – 2, у збірниках матеріалів і тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій – 32, з них індексованих у наукометричній базі Scopus – 16.

**Структура та обсяг роботи.** Робота складається з переліку умовних скорочень, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і двох додатків. Загальний обсяг роботи складає 402 сторінки друкарського тексту, з яких 308 сторінок основного тексту, 142 рисунки, 13 таблиць, список використаних джерел із 293 найменувань, 2 додатки на 13 сторінках. Додатки містять акти впровадження результатів дисертаційної роботи, а також список наукових праць автора.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, вказано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, сформульовано мету



і визначено основні завдання, об'єкт, предмет і методи дослідження, подано наукову новизну і практичну значимість отриманих результатів із вказівкою відомостей про впровадження результатів роботи, описано особистий внесок здобувача, наведено відомості про апробацію результатів роботи і про публікації за темою роботи, подано короткий опис структури і обсягу дисертації.

**Перший розділ роботи «Аналіз методів та технологій надання послуг в гетерогенних розподілених інформаційно-телекомунікаційних системах»** містить аналіз впливу системної архітектури розподілених гетерогенних інформаційно-телекомунікаційних систем на показники їх метрик якості. Проаналізовано цілі розроблення системних архітектур, здійснено порівняння архітектурних шаблонів інформаційно-комунікаційних систем. Встановлено, що архітектура системи ключовим чином впливає на значення метрик якості надання послуг. Кожна з архітектур характеризується окремим набором метрик, що дає змогу найбільш точно оцінити процес надання послуг.

Проаналізовано процеси комунікації у розподілених гетерогенних інформаційно-комунікаційних системах з урахуванням рівня застосунків:

- методи синхронізації часу;
- особливості комунікації у системах зі спільною пам'яттю;
- подано приклад комунікаційних інтерфейсів, орієнтованих на передавання даних;
- проведено аналіз процесів комунікації у розподілених гетерогенних інформаційно-телекомунікаційних системах на основі черг повідомлень;
- проаналізовано функціонування інтерфейсів передавання повідомлень;
- проведено аналіз проміжного програмного забезпечення, орієнтованого на обмін повідомленнями.

У досліджуваній інформаційно-телекомунікаційній системі (ІТС) використано архітектурний шаблон комунікації «публікація – підписка» (Рис. 1). Система базується на модифікованій трирівневій клієнт-серверній архітектурі.

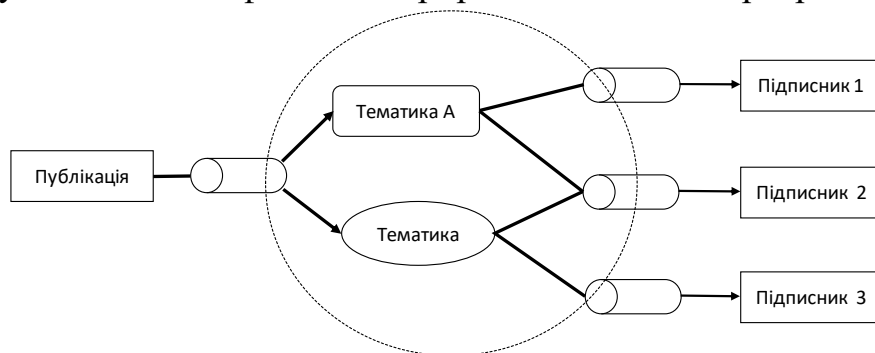


Рис. 1. Принцип обміну повідомленнями за архітектурою підписок

Проведений аналіз є основою для подальшого виконання завдань розроблення моделей компонентів досліджуваних інформаційно-телекомунікаційних систем та методів надання послуг в цих системах.

**Другий розділ роботи «Методи побудови та моделі гетерогенних розподілених інформаційно-телекомунікаційних систем»** присвячено розробленню та дослідженню методів побудови, зокрема, територіально-

залежних, розподілених гетерогенних інформаційно-телекомунікаційних систем. Запропоновано математичні моделі багаторівневих ІТС.

Запропоновано декомпозицію розподіленої гетерогенної системи відповідно до нової архітектури (Рис. 2).

Запропоновано математичну модель першого етапу надання послуг в гетерогенних сервісно-орієнтованих системах – пересилання запиту. Новизна запропонованого підходу полягає в прозорості використання мережевих ресурсів. Це означає, що мережа адаптована до вимог надання послуг.

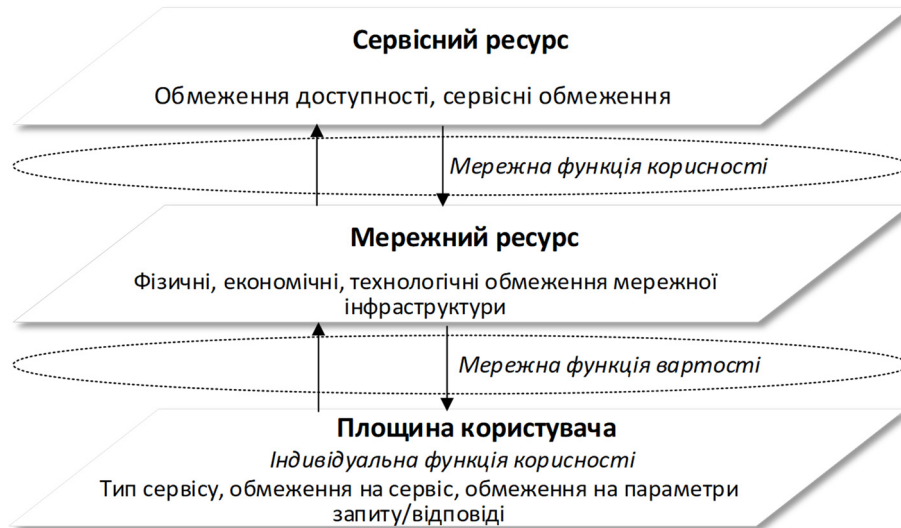


Рис. 2. Декомпозиція сервісної архітектури гетерогенної ІТС

Модель зводиться до обчислення матриці маршрутизації у мережі, представленої графом на площині

$$\mathbf{R} = [\mathbf{r}^1 \dots \mathbf{r}^S], \quad (1)$$

де  $\mathbf{r}^s = \mathbf{H}^s \mathbf{w}^s$  є вектором маршрутизації,  $\mathbf{H}^s$  визначає множину шляхів без контурів до  $S$ -го SI, і  $\mathbf{w}^s$  визначає частку навантаження на кожному шляху до  $S$ -го SI.

Сформульовано завдання розподілу ресурсів гетерогенних інформаційно-комунікаційних систем між сервісними потоками як нелінійну задачу оптимізації. Для зменшення складності задачі нелінійної оптимізації при розподілі пропускної здатності мережі між потоками сервісів пропонується багатопотокова декомпозиція та координація рішень на основі принципу оптимальності Беллмана (див. Рис. 3).

Функція корисності  $U_m^j(y_m^j)$  від  $M_n^j$  користувачів, де  $M_n = \sum_j M_n^j$ , при надсиланні сервісного потоку  $j$  агрегується до єдиного інтерфейсу доступу до мережі  $n$  (NAI) із загальною функцією корисності  $U_n^j(y_n^j)$ .

Загальна функція корисності  $U_n^j(y_n^j)$  є сумарним значенням загальних функцій корисності  $U_s^j(y_s^j)$ , що відображає значення корисності  $M_s^j = \sum_{j,n} M_n^j$  для всіх користувачів сервісу  $j$ , які шукають доступ до  $S$ -ого SI.

Крім того, ми утворюємо функцію корисності  $U^j$ , тобто суму функцій корисності  $U_s^j(y_s^j)$ , яка є спільною для всіх користувачів сервісу  $j$ ,  $M^j = \sum_{j,s} M_s^j$

$$\text{чи } M^j = \sum_s \sum_n \sum_m m_{n,s}^j$$

Опишемо функцію розподілу ємності мережі між сервісними потоками наступним чином:

$$\max_{x_k^j} \sum_{j=1}^J U^j \left( \sum_{k=1}^{|\{P_{pj}\}|} x_k^j \right), \quad (2)$$

з урахуванням обмежень:

$$\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^{|\{P_{pj}\}|} p_{k,l}^j x_k^j \leq c^l, \quad l=1, \dots, L. \quad (3)$$

$$\sum_{k=1}^{|\{P_{pj}\}|} x_k^j \leq \sum_s \sum_n \sum_m y_{m,n,s}^j, \quad j=1, \dots, J. \quad (4)$$

$$x_k^j \geq 0, \quad k=1, \dots, |\{P_{pj}\}|, \quad j=1, \dots, J. \quad (5)$$

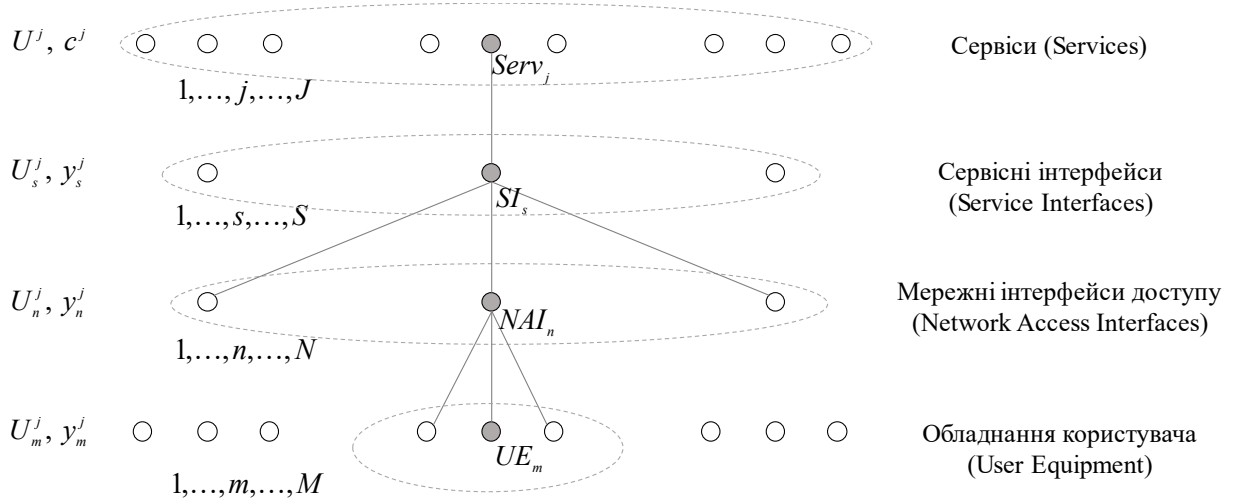


Рис. 3. Декомпозиція гетерогенної інформаційно-комунікаційної системи

На основі територіально-залежної моделі обслуговування отримано множину координат абонентів у процесі моделювання, класифіковано користувачів за критерієм швидкості руху, що забезпечує можливість централізації керування мобільністю в моменти перевантажень фрагментів мережі. Отримано сценарії переміщення абонентів, що складаються з індивідуальних траєкторій для кожного абонента, які формуються з урахуванням швидкостей та напрямків їх руху (Рис. 4).

Проведено моделювання процесу надходження запитів на ініціацію комунікації з використанням моделі активності клієнтів та врахуванням інформації про характеристики сеансів, отриманої шляхом імітаційного моделювання (Рис. 5).

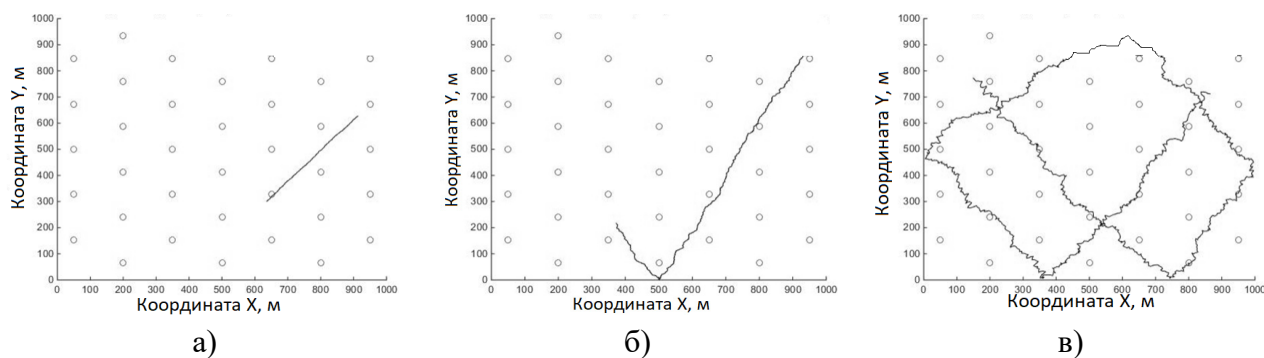


Рис. 4. Траєкторії переміщення користувачів зі швидкостями (м/с) між точками присутності послуг: а)  $0.25 < V_{аб} \leq 0.5$ ; б)  $1 < V_{аб} \leq 2$ ; в)  $4 < V_{аб} \leq 8$

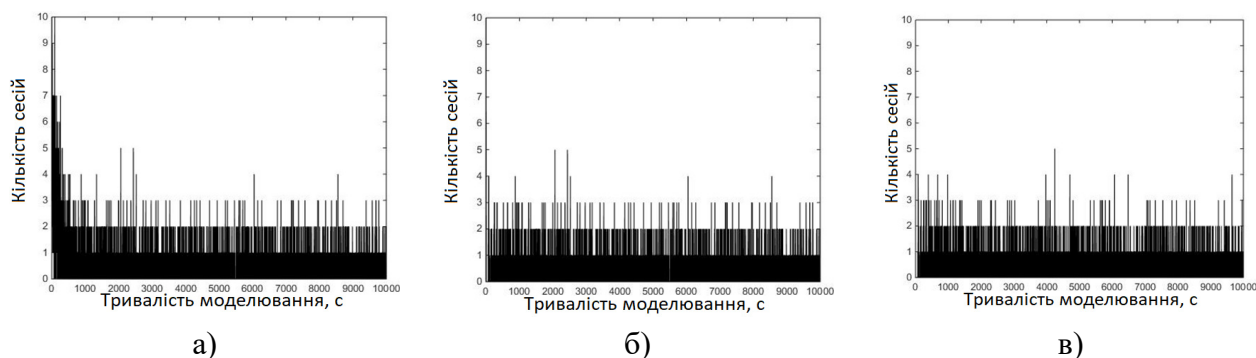


Рис. 5. Інтенсивність надходження запитів на встановлення комунікаційних сеансів (а), початку (б) та завершення (в) їх обслуговування

Отримано значення завантаження та втрат у системі (Рис. 6), де спостерігаються перевантаження фрагментів мережі. Отримані параметри процесів комунікації дають змогу охарактеризувати процес надання послуг у системі шляхом розрахунку імовірності втрат і системної доступності.

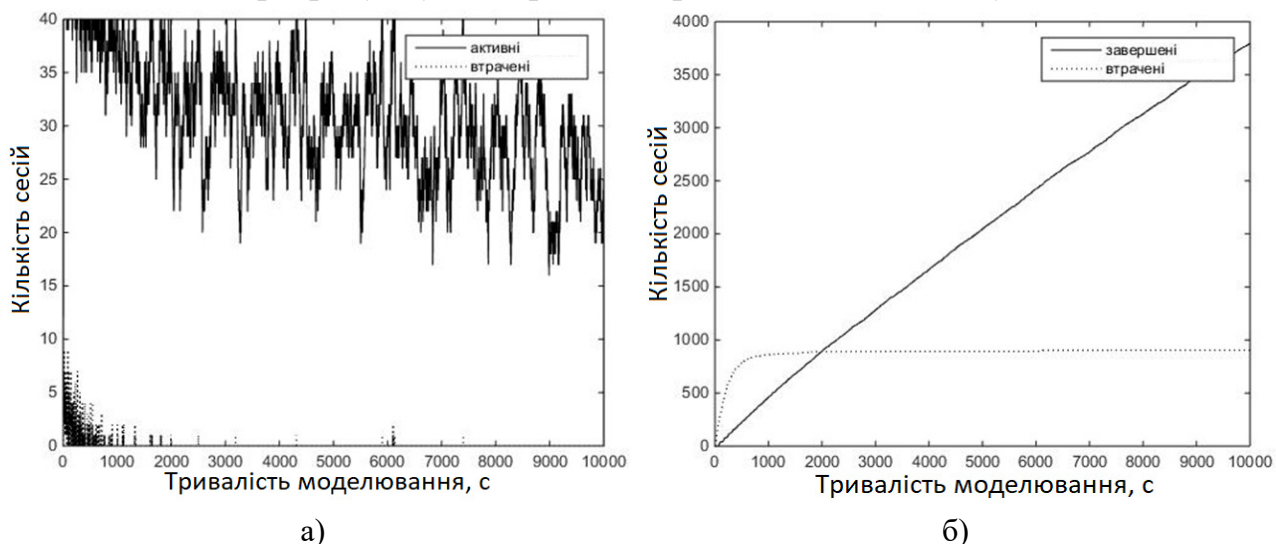


Рис. 6. Моделювання мережної активності абонентів: а) миттєвої; б) сумарної

Проведено моделювання поведінки абонентів інформаційно-телекомунікаційної системи з урахуванням їх активності та переміщення.

Розроблений метод розбиття території на зони обслуговування забезпечує мінімізацію кількості точок присутності послуг. Моделювання переміщення споживачів послуг забезпечує можливість прогнозування завантаження окремих точок присутності послуг, що дає змогу підвищити ефективність балансування

навантаження. Модель активності користувачів послуг дає змогу врахувати тривалості сесій, інтенсивності надходження запитів, процеси обслуговування та максимальну кількість конкурентних сеансів у системі, що забезпечує підвищення адекватності моделювання завантаженості системи точок присутності послуг.

Запропонований метод балансування навантаження (БН) з багатоетапним перемиканням точок присутності послуг збільшує доступність інформаційних ресурсів у періоди пікових навантажень. Збитки від втрачених комунікаційних сеансів скоротились на 14% у порівнянні зі звичайним режимом роботи системи (Рис. 7).

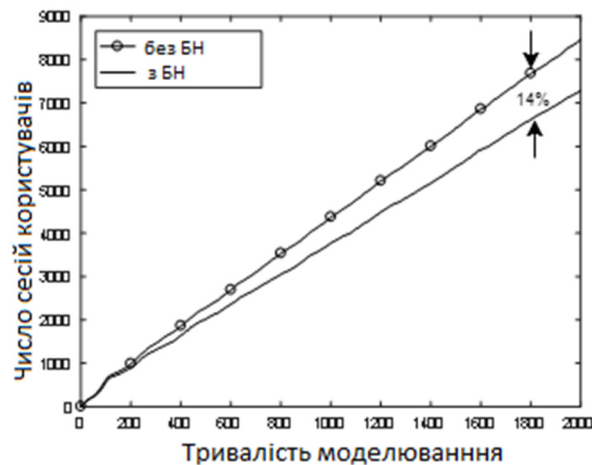


Рис. 7. Кількість втрачених сесій без та з використанням алгоритму балансування навантаження (з БН)

Глобальне масштабування та ускладнення розподіленої структури інформаційно-телекомунікаційної системи потребує забезпечення достатньої кількості ресурсів обробки сервісів для відповідної взаємодії між користувачькими та сервісними інтерфейсами під час виконання деяких застосунків. Ефективна і правильна конфігурація такої системи (як структури взаємоз'єднання фізичних інтерфейсів, так і керування потоком) здійснена шляхом розрахунку необхідних параметрів для максимізації продуктивності службової інфраструктури та забезпечення процесів передавання сервісних потоків з мінімальними затримками, що значно підвищує показники якості надання послуг масштабованої розподіленої сервісної системи та унеможливорює відмову в обслуговуванні коли кількість активних користувачів та їх вимоги різко зростають. Представлено відповідні критерії розв'язання завдань у суворій відповідності зі сформульованою гіпотезою математичними перетвореннями з отриманням практично реалізованих формул та підходів.

Завдання забезпечення потоків даних задовільним сервісом полягає у оптимальному комбінуванні фізичної і логічної структур телекомунікаційної мережі. Обидві компоненти є одним цілим і, в залежності від зв'язності структури, стають домінуючими при впливі на якість сервісу. Тому розв'язано два підзавдання: вибір фізичної структури (Рис. 8) та зміна логічної структури, обраної протоколами маршрутизації, для забезпечення потокам задовільного рівня якості сервісу.

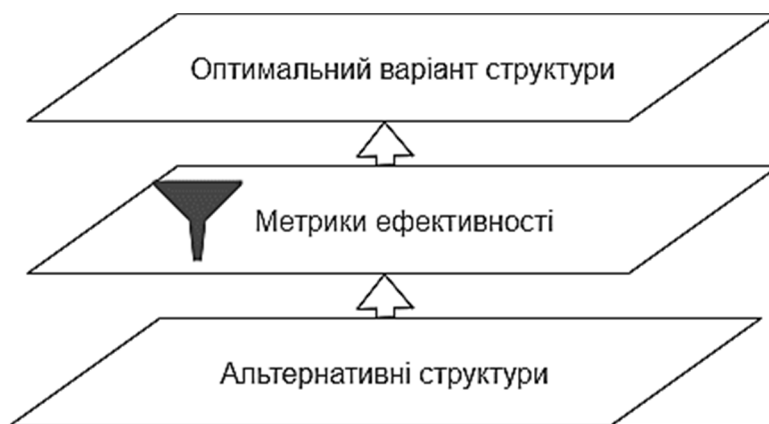


Рис. 8. Ієрархічне представлення процесу забезпечення потоків даних задовільним сервісом за методом аналізу ієрархій

У третьому розділі «Методи структурно-функціонального синтезу телекомунікаційної підсистеми інформаційно-телекомунікаційних систем» запропоновано методи та виконано дослідження на підставі моделей процесу маршрутизації сервісних потоків та надання послуг з урахуванням рівня підписки.

Проведено дослідження конфігурацій мережевих топологій на основі теорії графів із їх інтегральним оцінюванням за методом аналізу ієрархій. Розроблено модель, що дає змогу згенерувати всі варіанти конфігурації топологій із заданою кількістю вузлів та здійснити їх порівняльне дослідження за такими метриками, як пропускна здатність та затримка передавання інформації. Отримані результати дають можливість визначити ефективність вибору шляхів у досліджуваному варіанті топології та порівняти її з еквівалентними конфігураціями. У процесі вибору конфігурації топології телекомунікаційної мережі саме врахування інтегральної оцінки забезпечує підвищення ефективності функціонування протоколів динамічної маршрутизації під час її функціонування.

За результатами моделювання було отримано інтегральну оцінку для кожної з досліджуваних топологій. На Рис. 9 представлено гістограму розподілу отриманих оцінок для різних варіантів структур телекомунікаційної мережі.

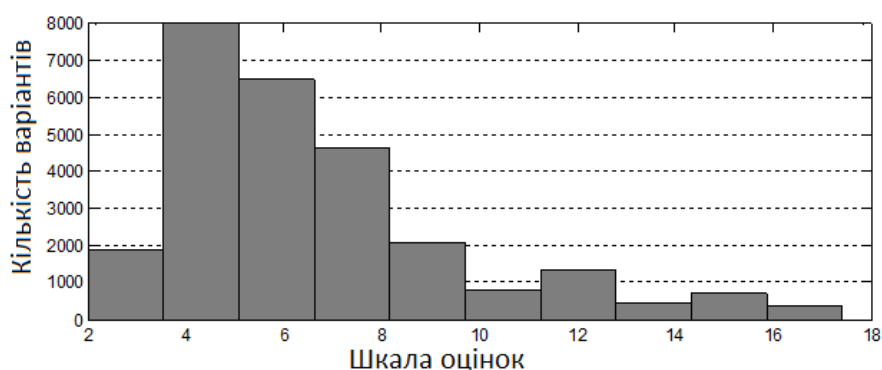


Рис. 9. Гістограма отриманих оцінок варіантів структур телекомунікаційної мережі з 6-ма вузлами

Завдання маршрутизації для сучасних телекомунікаційних мереж може бути сформульоване і розв'язане із використанням методів алгебраїчної топології. Запропонований метод має декілька основних властивостей:

– скориговані розв'язки завдання маршрутизації створюють також ациклічні потоки;

– керування потоками по замкнутому контуру зберігає стабільність станів мережі;

– керування потоками по замкнутому контуру може здійснюватися на основі розподіленого алгоритму, де кожен вузол оновлює свою таблицю маршрутизації автономно. Це допомагає досягти збалансованого завантаження черг між мережевими вузлами.

Алгоритм є розподіленим і не використовує будь-яку глобальну інформацію. Між сусідніми вузлами передається лише інформація про стан черг. Цей алгоритм виконується частіше, ніж для номінального стаціонарного розв'язку маршрутизації. Приклад розв'язку завдання маршрутизації представлено на Рис. 10.

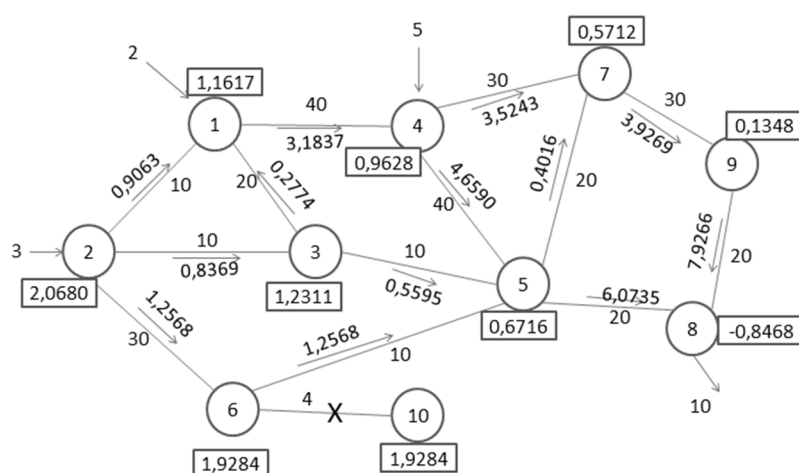


Рис. 10. Приклад розв'язку завдання маршрутизації на основі інформації про стан черг у мережі з 10-ма вузлами

Проведено дослідження архітектури телекомунікаційного каналу з підтримкою множини класів обслуговування (Рис. 11), де кожен клас обслуговування характеризується високими вимогами до метрик QoS.

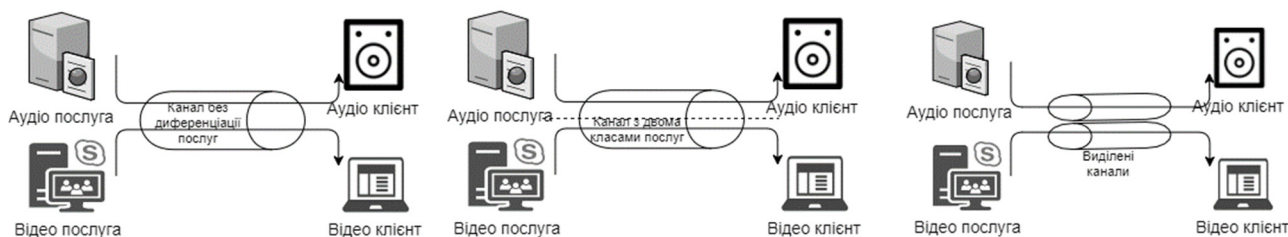


Рис. 11. Графічне представлення 3 типів обслуговування в каналі передавання

Визначено оптимальний процес адаптації каналу для підтримки декількох класів обслуговування (Рис. 12) і отримано залежності для QoS в межах кожного класу за оптимальної політики адаптації. Значення QoS може бути отримане відповідно до розробленої політики контролю доступу, яка виключає необхідність в динамічній адаптації. Проведено дослідження процесу обслуговування аудіо- та відеопотоків за трьох типів обслуговування і встановлено умови, за яких використання кожного із досліджених типів обслуговування є оптимальним (див. Рис. 13).



Рис. 12. Графічне представлення режиму адаптації інтенсивності аудіо- та відеопотоків за кожним із трьох типів обслуговування

Запропоновано розв'язок завдання розподілу ресурсів між мережними сервісними потоками за умови рівноправної конкуренції та за умови доступності фізичних ресурсів для оцінки максимальної кількості клієнтів, які можуть використовувати послугу з різними рівнями якості обслуговування.

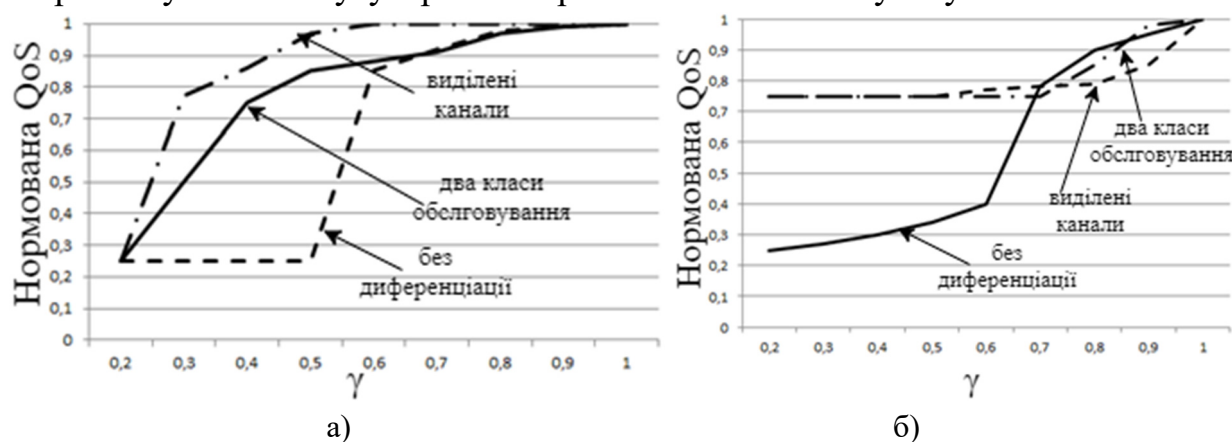


Рис. 13. Залежність нормованого рівня підписки для аудіо (а) та відеопотоків (б) від параметра масштабування  $\gamma$  для кожного з трьох типів обслуговування

Завдання сформульовано в термінах теорії графів і розв'язано методом лінійного програмування для заданого графа мережі.

Телекомунікаційна мережа представлена графом  $G = (V, E)$ , з логічною структурою

$$L = \{\mu(1,2); \mu(1,3); \dots; \mu(i, j)\}, \quad (6)$$

де  $i, j \in V$ , утвореною за допомогою алгоритму динамічної маршрутизації.

Логічна структура обмежує використання фізичних ресурсів, представлених вектором  $\vec{x}$ . Розрахунок елементів цього вектора може бути виконаний шляхом розв'язання завдання лінійного програмування, представленого наступною системою нерівностей:

$$\begin{aligned} A \times x &\leq b \\ \min_x f^T x, \quad A_{eq} \times x &= beq, \\ eb &\leq x \leq ub \end{aligned} \quad (7)$$

де  $f(x)$  – цільова функція;  $A, A_{eq}$  – коефіцієнти лінійних рівнянь;  $x$  – шукана змінна;  $eb, ub$  – верхня і нижня межі шуканої змінної.

Запишемо завдання оптимізації у такому вигляді:



$$\min_x f(x), \quad (8)$$

де  $f(x)$  – лінійна цільова функція, що розраховується як

$$f(x) = -\sum_{(i,j)} x_{i,j}, \quad (9)$$

де  $i, j$  – номери вузлів,  $x_{i,j}$  – змінна, яка визначає швидкість сервісного потоку між парою вузлів. Розв'язок цього завдання має задовольняти системі обмежувальних умов:

– обмеження продуктивності вузла:

$$\sum_{j \in \mu(i,j)} x_{i,j} + 2 \cdot \sum_{k \in \mu(i,j)} x_{k,j} + \sum_{i \in \mu(i,j)} x_{i,j} \leq \sum_{j \in V} C_{i,j}, \quad (10)$$

де  $C_{i,j}$  – пропускна здатність каналу  $(i, j)$  (в умовних одиницях),  $\mu(i, j)$  – маршрут між парою вузлів  $i, j$ ;

– обмеження пропускної здатності каналу:

$$\sum_{i,j \in \mu(i,j)} x_{i,j} \leq C_{i,j}; \quad (11)$$

– обмеження конкуренції інформаційних потоків:

$$0,5 \cdot \frac{C_{i,j}}{N_{\mu(i,j)}^{\max}} \leq x_{i,j} \leq C_{i,j}, \quad (12)$$

де  $N_{\mu(i,j)}^{\max}$  – максимальна кількість потоків, що передають у каналі  $(i, j)$ , який належить до маршруту  $\mu(i, j)$ .

В дисертації досліджено вплив логічної структури телекомунікаційної системи на використання мережних ресурсів (Рис. 14).

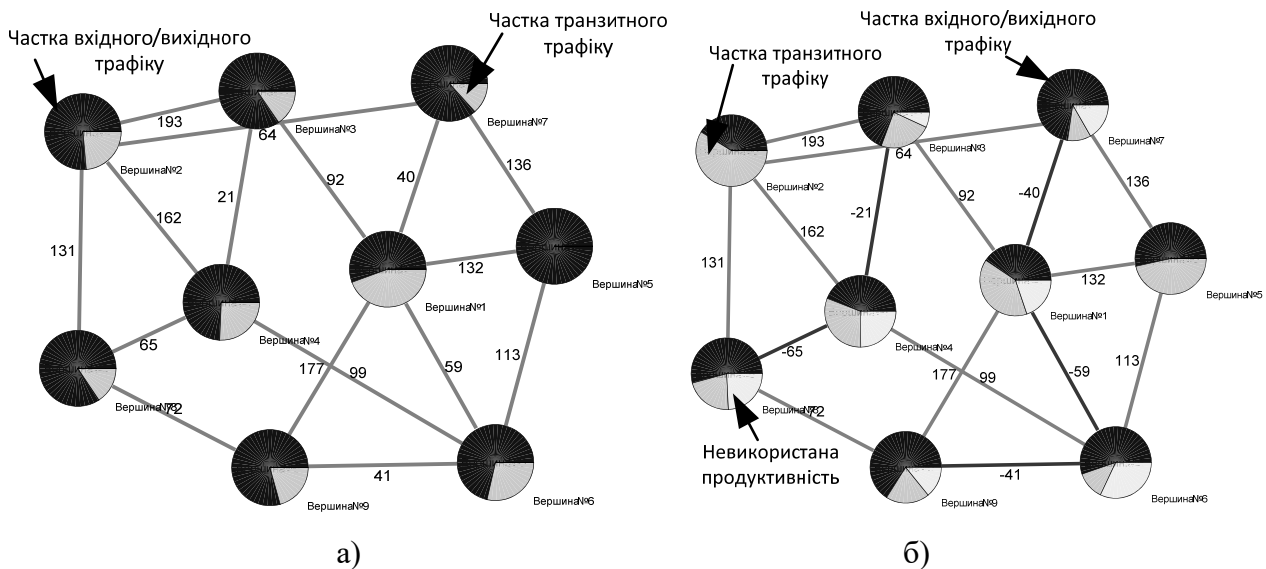


Рис. 14. Розподіл мережних ресурсів у логічній структурі, сформованій:

а) відповідно до протоколу RIP (Routing Information Protocol); б) відповідно до протоколу OSPF (Open Shortest Path First) (чорний – сервісний потік, сірий – транзитний трафік з інших сервісних потоків)

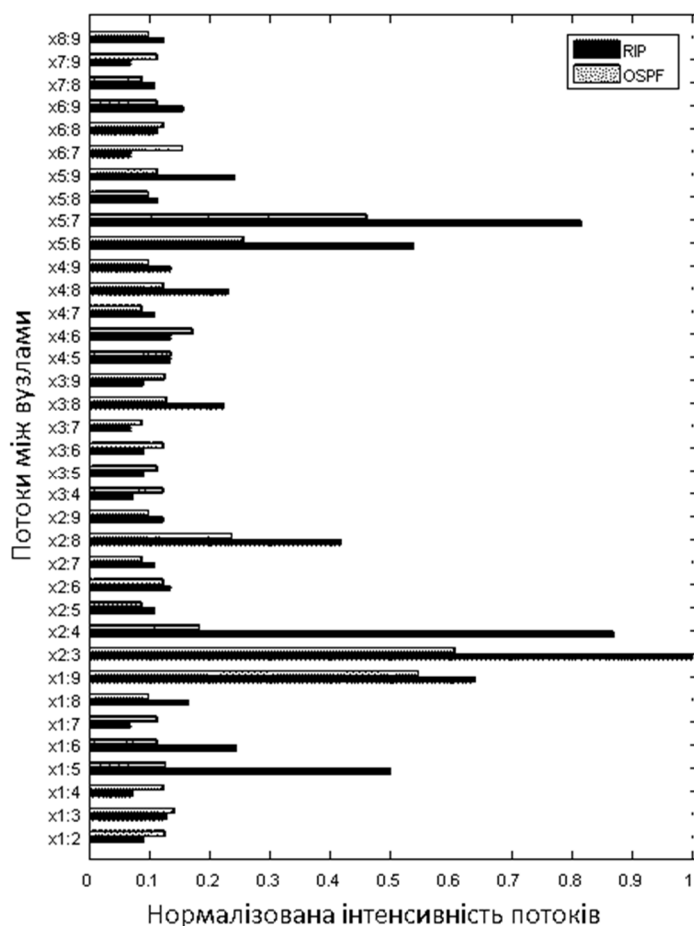


Рис. 15. Порівняння результатів досліджень для протоколів RIP та OSPF

Результати свідчать, що у випадку формування логічної структури за протоколами RIP потоки в рівній конкуренції досягають своєї максимальної інтенсивності і використовують всі доступні мережеві ресурси.

У випадку OSPF, використовуються не всі доступні фізичні ресурси, оскільки отримані за цим протоколом розв'язки оминають канали з мінімальною пропускну здатністю. Це дає змогу виявити надмірність у фізичній структурі та зменшити вартість мережі або змінити політику маршрутизації шляхом введення k-шляхової маршрутизації через невикористані канали, і, як наслідок, – підвищивши продуктивність мережі. Розв'язок поставленого оптимізаційного завдання представлено на Рис. 15.

В четвертому розділі роботи «Методи керування конфігурацією та забезпечення катастрофостійкості інформаційної підсистеми інформаційно-телекомунікаційних систем» проведено дослідження методів керування конфігурацією і відновлення працездатності системи після явищ катастрофічного характеру. Запропоновано нові моделі корпоративного клієнта та спільної cloud-інфраструктури.

Розроблено нову модель корпоративного клієнта інформаційно-комунікаційної системи надання послуг (Рис. 16). Ця модель відрізняється від відомих тим, що реалізована у вигляді програмного узагальненого коду, який внаслідок ініціалізації його параметрами, дає змогу утворити як завгодно багато об'єктів, що представляють корпоративну клієнтську інфраструктуру. Вона використана у подальшому у процесі навантажувального тестування як елемент

інформаційно-телекомунікаційної системи надання послуг. Перевагою моделі є її масштабованість, тобто додавання нових елементів інфраструктури клієнта або ж видалення існуючих, що реалізується зміною у програмному коді і повторною ініціалізацією об'єкта інфраструктури корпоративного клієнта. Модель базується на принципі функцій корисності, який сформульовано у другому розділі роботи.

Розроблено нову модель спільної cloud-інфраструктури (Рис. 17). Ця модель реалізована у вигляді програмного коду, і, як і попередня, базується на технології імітаційного моделювання.

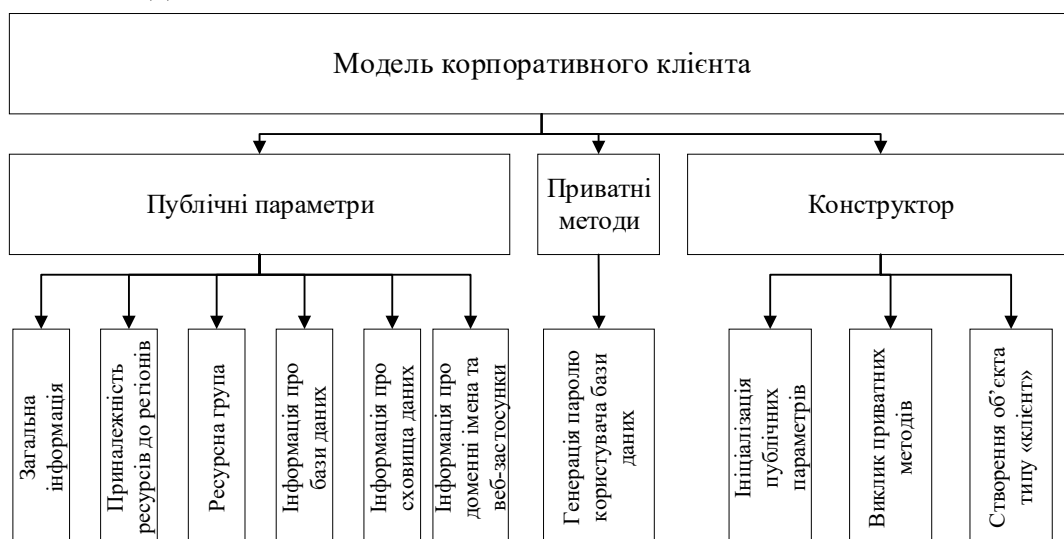


Рис. 16. Структурна схема моделі корпоративного клієнта розподіленої гетерогенної інформаційно-комунікаційної системи надання послуг

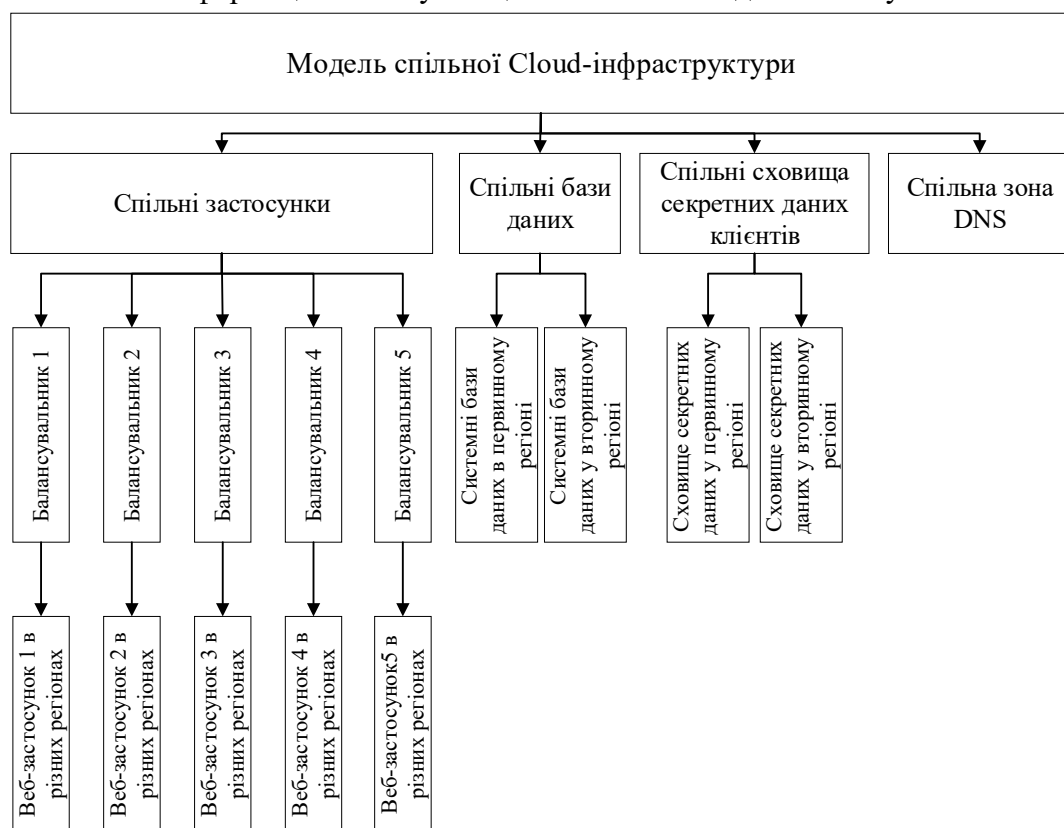


Рис. 17. Структурна схема моделі спільної інфраструктури розподіленої гетерогенної інформаційно-комунікаційної системи надання послуг

Вона дає змогу представити спільну мультиклієнтську інфраструктуру у вигляді ініціалізованого параметрами програмного об'єкта, який поєднано із клієнтським програмним об'єктом. Згадані дві моделі формують розподілену гетерогенну інформаційно-телекомунікаційну систему надання послуг, поведінка якої під впливом користувацького навантаження досліджена у шостому розділі роботи.

Розроблено та досліджено комплексну систему інформаційної безпеки у телекомунікаційному сегменті розподіленої гетерогенної інформаційно-телекомунікаційної системи. Дана система базується на моделюванні зловмисної поведінки та мережних атак на інформаційні ресурси до застосування заходів захисту та після їх імплементації. Результати показують, що досягнуто зниження впливу атак на інформаційно-телекомунікаційну систему більш, ніж на 90%.

Для підтвердження адекватності використаних моделей та моделі системи у цілому проведено дослідження процесу реальної мережної атаки на велику інформаційну мережу та ефективності боротьби з такого роду інформаційними загрозами. Встановлено, що запропонована система функціонує втричі ефективніше (Рис. 18, Рис. 19).

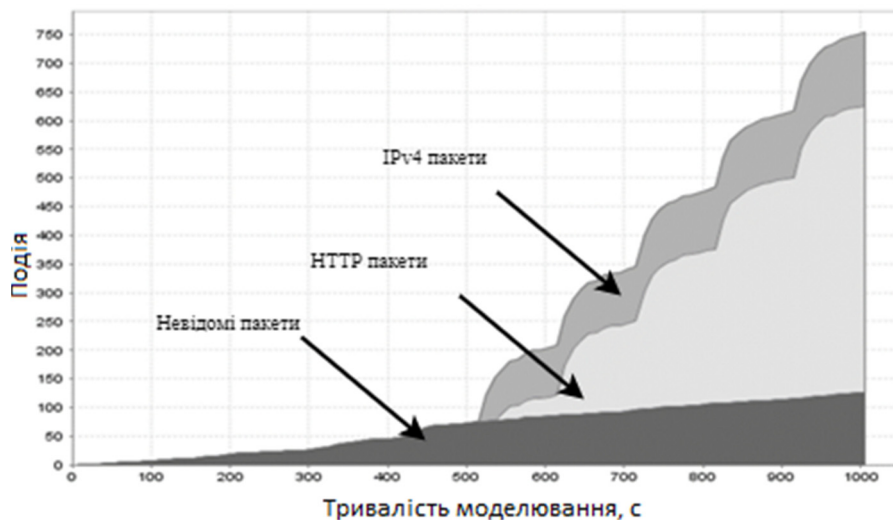


Рис. 18. Трафік на інтерфейсі веб-сервера без мережевого екрану під час атаки



Рис. 19. Трафік на інтерфейсі веб-сервера з мережним екраном під час атаки

Досліджено процес відновлення інфраструктури після катастрофи на базі ручної та автоматичної активності. На підставі аналізу встановлено, що одним із найважливіших показників ефективності цього процесу є тривалість відновлення

після аварій. Тому у процесі моделювання увагу сфокусовано на вивченні цього параметра. Блок-схему запропонованого нового методу відновлення cloud інфраструктури після явищ катастрофічного характеру представлено на Рис. 20.

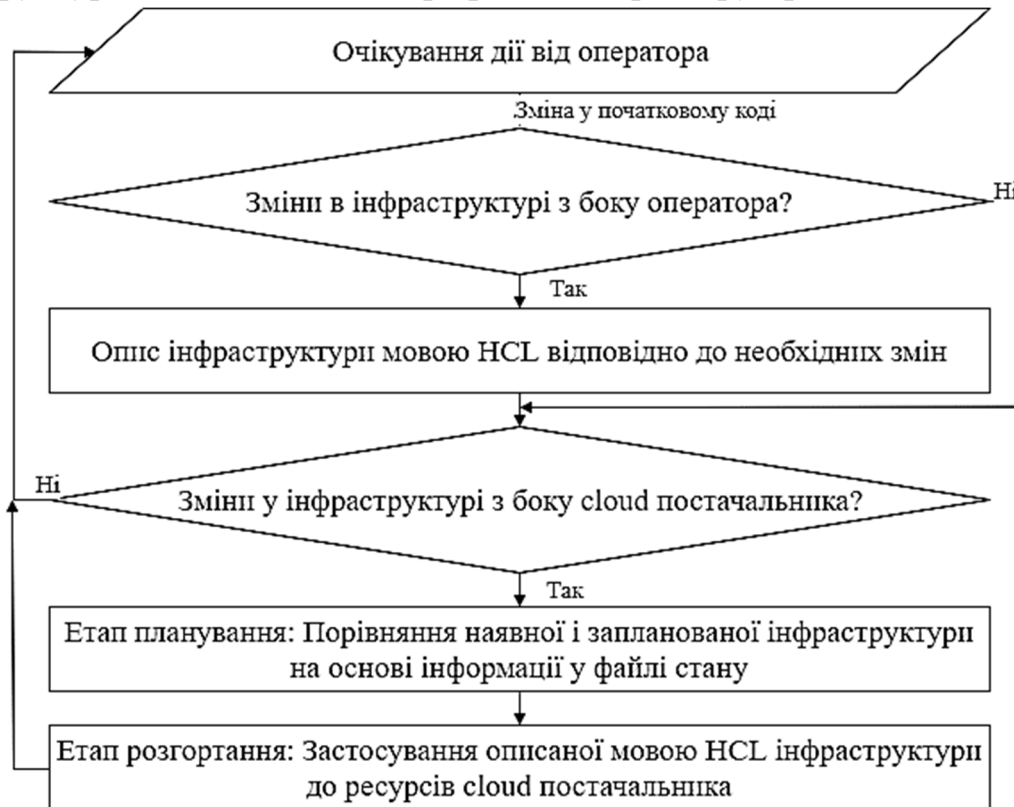


Рис. 20. Блок-схема створення хмарної інфраструктури з використанням Terraform, включаючи можливість відновлення після катастроф

Проведено оцінювання тривалості у випадку ручного та автоматичного відновлення на основі концепції IaaS. Отримані результати підтвердили переваги підходу IaaS для відновлення після аварій. Значення виграшу залежить від складності хмарної системи і може відрізнятись на порядок (Рис. 21).

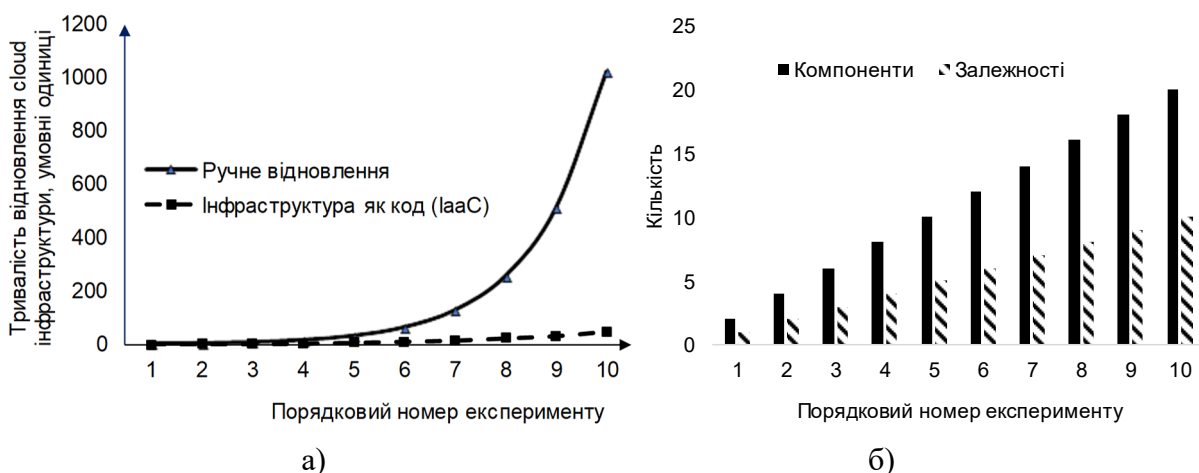


Рис. 21. Співвідношення між ручним та автоматичним відновленням працездатності у вимірі тривалості відновлення (а) з урахуванням кількості cloud-компонентів та середньої кількості залежностей між елементами у cloud-інфраструктурі (б)

У п'ятому розділі «Моделі надання послуг в гетерогенних інформаційно-комунікаційних системах» представлено концепцію безперервної інтеграції у процесі розроблення та надання інформаційно-

комунікаційних сервісів, запропоновано адекватну модель програмного компонента ІТС і досліджено процес розгортання та функціонування хмарних інформаційно-комунікаційних сервісів в cloud-інфраструктурі.

Проведено аналіз процесу безперервної інтеграції (БІ) та запропоновано архітектуру його реалізації. Показано приклад процесу БІ (Рис. 22), який використовує вільне програмне забезпечення та забезпечує високу якість та підтримку оновлення версії сервісу за допомогою системи контролю версій, статичного аналізу якості програмного коду, автоматизованого тестування та утворення виконуваних файлів. Запропонована архітектура може бути впроваджена в сучасних інформаційно-комунікаційних системах, оскільки доставка послуг включає в себе сервісну інтеграцію, а також передавання послуг кінцевому користувачеві.

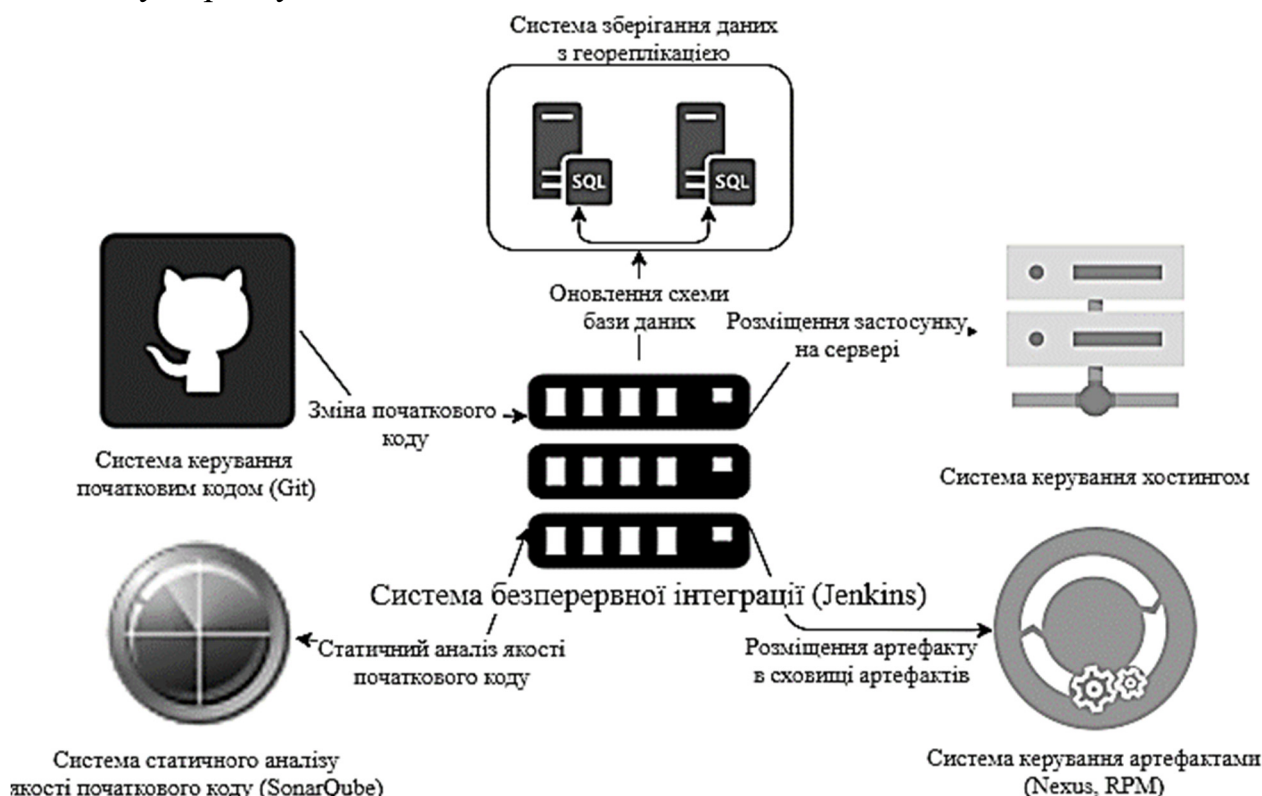


Рис. 22. Структурна схема запропонованої реалізації процесу БІ

Слід брати до уваги поведінку телекомунікаційної мережі не тільки під час процесу доставки, але й під час безперервної інтеграції сервісу, оскільки компоненти цього процесу є територіально рознесені та поєднуються мережними засобами. Зважаючи на ефективність роботи мережі в процесі передачі сервісних потоків, варто враховувати потреби сервісу, а саме його пріоритет та важливість.

Проведено дослідження методу повної впорядкованої групової розсилки в розподілених базах даних з синхронізацією на основі логічного годинника Лампорта.

Проаналізовано його ефективність у каналах зв'язку типу FIFO та non-FIFO. Встановлено, що використання цього методу у реальних системах ускладнене тим, що задовільно працює лише в каналі FIFO. У зв'язку з цим запропоновано удосконалений метод повної впорядкованої групової розсилки, який дає

можливість зберігати працездатність процесу синхронізації навіть за умови, що повідомлення процесу-відправника втрачається. Удосконалення методу (Рис. 23) полягає у обмеженні часу очікування на відповідь від усіх процесів-адресатів. Це забезпечує зниження імовірності відмови процесу.

Проте, зростає кількість службової інформації, яка циркулює у мережі передавання даних. Результати роботи запропонованого удосконаленого методу подано на Рис. 24.

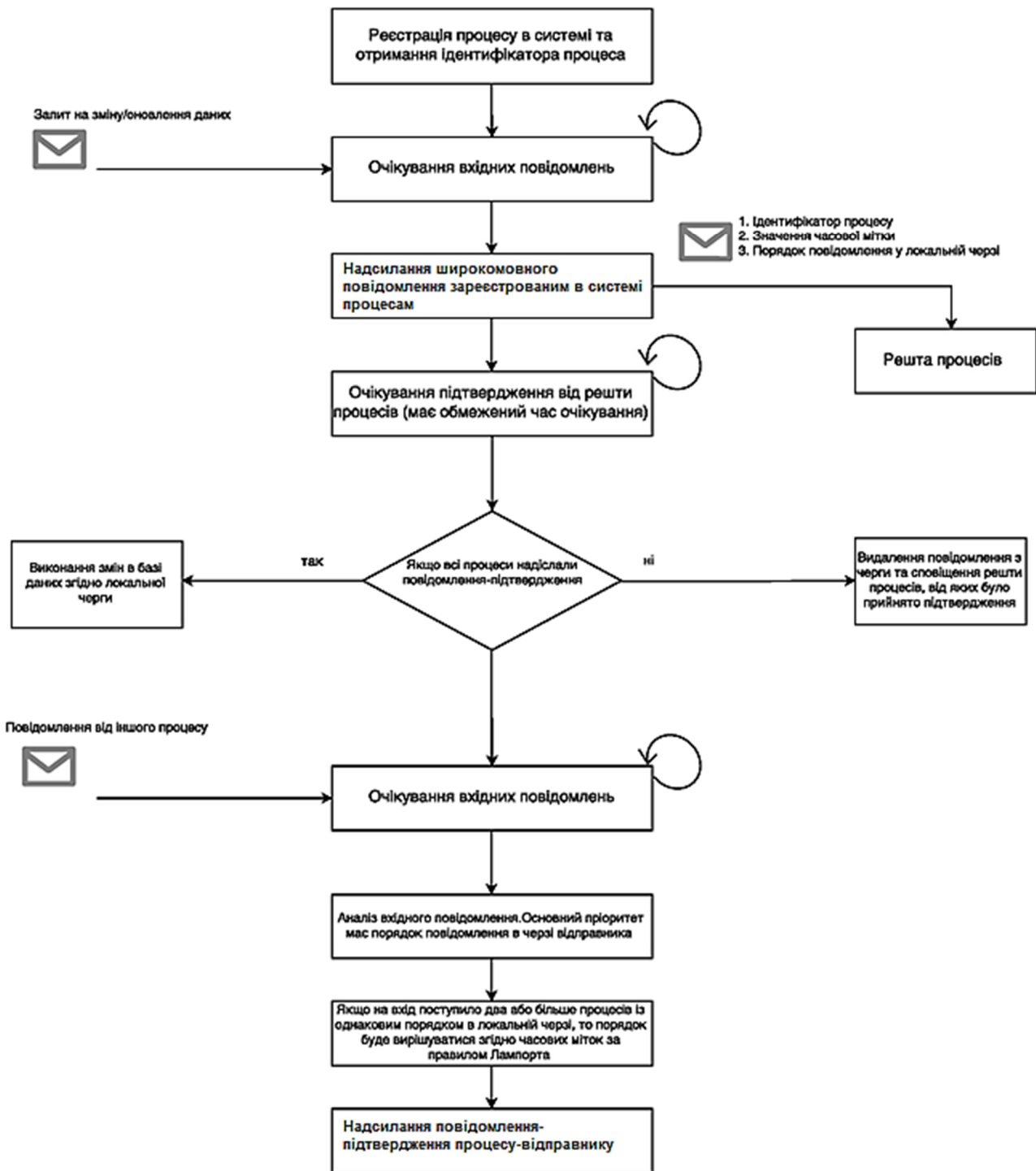


Рис. 23. Блок-схема удосконаленого методу повного групового розсилання у розподілених інформаційно-телекомунікаційних системах

Для підтвердження адекватності розробленої моделі програмного компонента ІТС досліджено процес обслуговування мультимедійних

інформаційних потоків апаратним маршрутизатором та програмним компонентом гетерогенної розподіленої інформаційно-телекомунікаційної системи. Отримано продуктивність програмного компонента у режимі без утворення черг. Адекватність перевірено на основі порівняння затримки пакетів у програмному та апаратному вузлах.

Для підвищення точності оцінок затримки дослідження виконано із трьома послідовно включеними вузлами мережі. Визначено затримку формування потоку програмним генератором та її частку у тривалості передавання пакету від генератора до одержувача. Максимальне відхилення затримки пакетів між програмним та апаратним компонентами знаходиться в межах 0,5%. Підтверджено статистичну гіпотезу про відповідність законів розподілу затримок у програмному та апаратному вузлах.

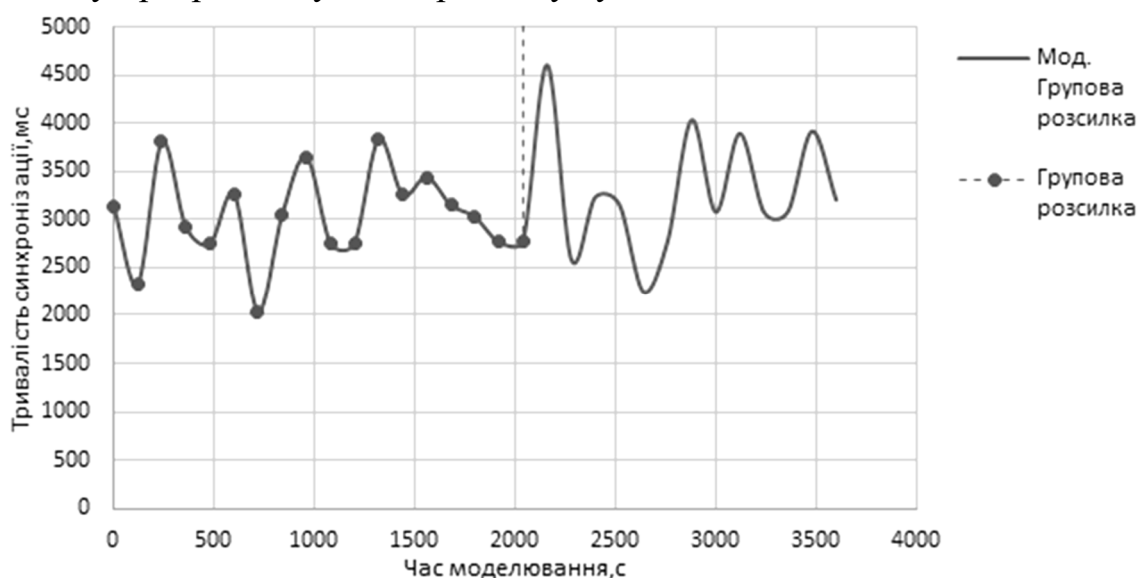


Рис. 24. Середня тривалість синхронізації за час моделювання для двох методів з використанням non-FIFO каналу (з втратою одного повідомлення)

Доведено, що балансування навантаження за допомогою інтегрованої системи керування розгортанням інформаційних сервісів дає змогу зменшити тривалість обслуговування запитів у середньому у 3 рази (Рис. 25). Інтегральна оцінка використання телекомунікаційних та інформаційних ресурсів показала, що запропонований метод дав змогу зменшити затримку надання сервісу та розвантажити найбільш завантажені сервери.

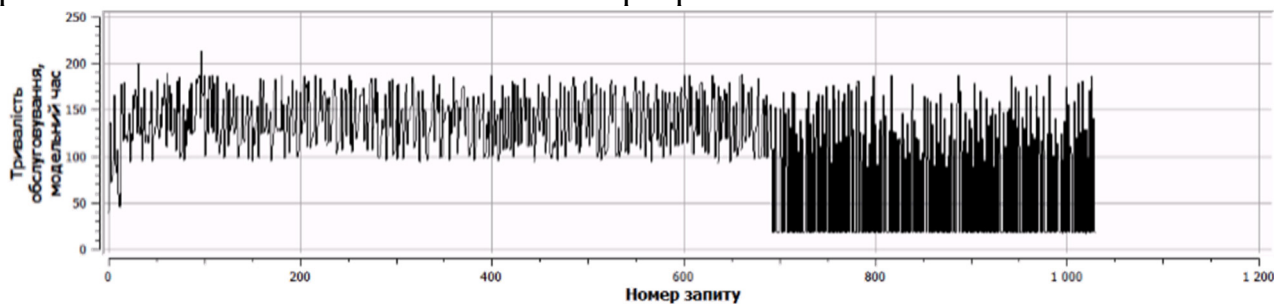


Рис. 25. Тривалість обслуговування запитів без та з використанням інтегрованої системи розгортання сервісів

Для дослідження балансування потоків IPTV розроблено дворівневу марківську модель такого потоку на основі як просторової, так і часової кореляції



в кодових послідовностях MPEG. Модель описує динаміку процесу зміни кадрів і груп зображень в потоці IPTV та дає змогу оцінити характер потоку у процесі балансування навантаження за методом Round Robin DNS (Domain Name System).

Для дослідження затримок обслуговування запитів у розподіленій системі з балансуванням навантаження, згідно згаданого методу, розроблено модель пересилання запитів (Рис. 26) та виведено співвідношення (13) для оцінювання затримки в каналах зі змінною пропускну здатністю.

Якщо час, необхідний для відправки відповіді DNS, перевищує час, необхідний для отримання та обробки запиту, то загальний час, необхідний для завершення запиту, буде часом, необхідним для відправки DNS-відповідей, плюс час, необхідний для отримання і оброблення першого запиту. Таким чином, відповідна формула для обчислення загального часу від початку запиту до закінчення його оброблення буде:

$$T = P + \frac{S_Q}{BW_1 * C_1} + \frac{(N+1)S_R}{BW_2 * \left( \frac{N * S_R}{BW_2} + C_2 \right)}, \quad (13)$$

де  $T$  час (у мілісекундах) необхідний для завершення опрацювання запиту DNS,  $N$  - це кількість запитів DNS, які передують розглянутому запиту в серверній черзі,  $P$  - це час (в мілісекундах), необхідний серверу для оброблення певного запиту,  $S_Q$  - це розмір (у кілобайтах) запиту DNS,  $BW_1$  - це пропускну здатність каналу зв'язку (в Мбіт/с) від клієнтів до DNS-сервера,  $BW_2$  - це пропускну здатність каналу зв'язку (в Мбіт/с) від DNS-сервера до клієнтів,  $C_1$  - це завантаженість каналу від клієнтів на сервер DNS (величина між 0 та 1),  $C_2$  - це завантаженість каналу з DNS-сервера до клієнтів (величина між 0 та 1).

Наведено порівняльні оцінки затримки (Рис. 27), які дають змогу стверджувати, що зростання пропускну здатності каналу у 10 разів призводить до зниження затримки обслуговування запиту у середньому до 2,5 разів, що пояснюється обмеженнями методу балансування навантаження.

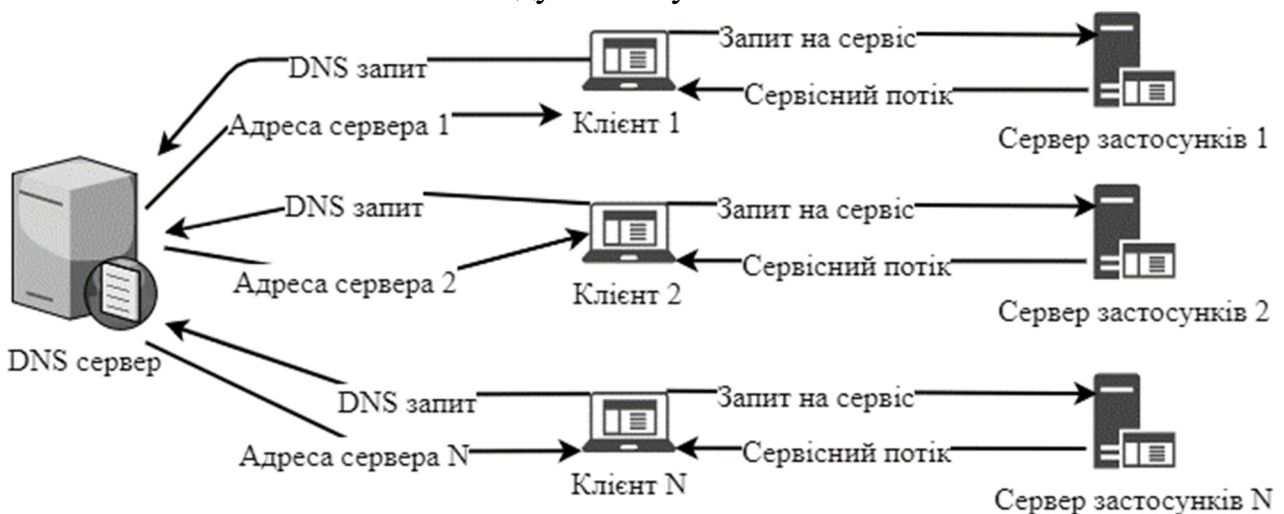


Рис. 26. Модель механізму балансування Round-robin DNS

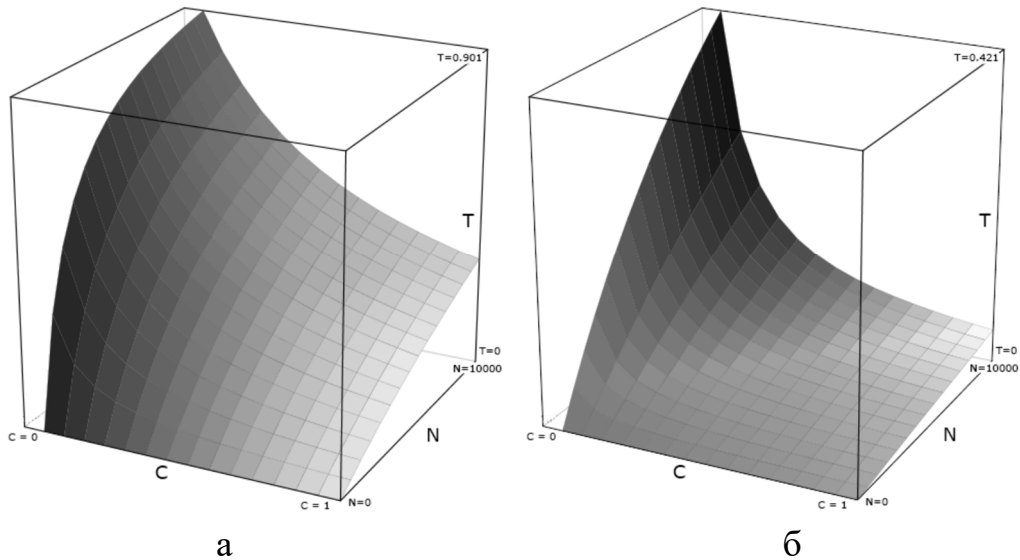


Рис. 27. Залежність тривалості опрацювання запиту від кількості запитів у черзі та завантаженості: а) каналу 100 Мбіт/с та (б) каналу 1 Гбіт/с

В шостому розділі роботи «Побудова та тестування поведінки складної інформаційно-телекомунікаційної системи в умовах зростання навантаження» проведено дослідження методів надання інформаційно-телекомунікаційних сервісів у cloud-інфраструктурі постачальника сервісів з вивченням питання використання PaaS-cloud-систем (Platform as a Service) для розгортання IaaS-реалізацій (Infrastructure as a Service) ІТС у вигляді системи веб-застосунків, баз даних, сховищ даних тощо. Із використанням моделей корпоративного клієнта, спільної cloud-інфраструктури та реалізованої логіки досліджуваної ІТС проведено дослідження поведінки системи під впливом зростання навантаження. Для цього розроблено методику навантажувального тестування, яка дає змогу оцінити поведінку інфраструктурного та аплікаційного компонентів ІТС.

Представлено методи розгортання cloud-інфраструктур на основі принципу PaaS.

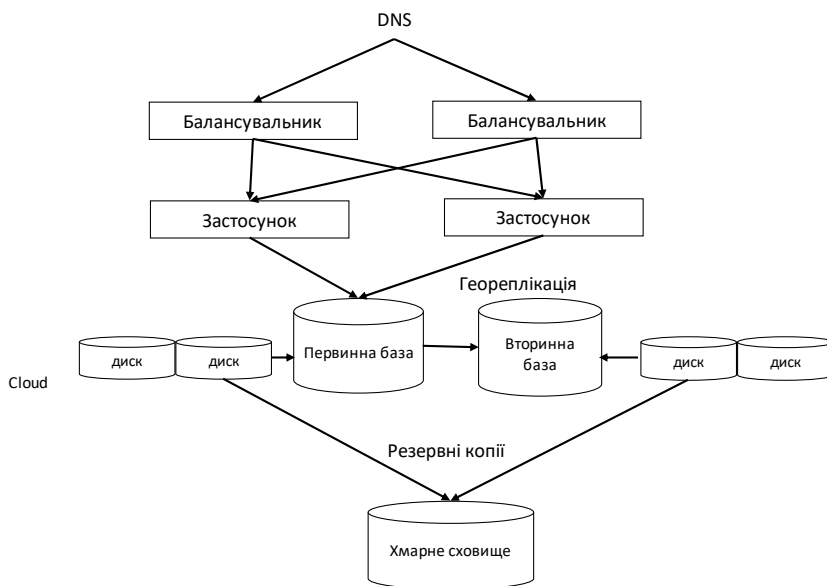


Рис. 28. Тривірнева архітектура хмарної інформаційно-телекомунікаційної системи з дублюванням компонентів та геореплікацією

Подано характеристики надання послуг в інформаційно-телекомунікаційних системах, побудованих на основі cloud-сервісів. Запропоновано удосконалену трирівневу архітектуру (Рис. 28) інформаційно-телекомунікаційних систем із резервуванням, побудованих із застосуванням cloud-сервісів. Представлено концепцію локального кешування вмісту баз даних із застосуванням принципу стано-незалежних серверів.

Проведено дослідження доступності cloud-сервісів у інформаційно-телекомунікаційних системах із багатокомпонентною структурою cloud-інфраструктури із застосуванням методу оцінки доступності багатоланкових структур. Оцінено середню та ефективну доступності, та їх залежності від обслуженого навантаження та кількості фізичних серверів у системі (Таблиця 1).

Отримані результати характеризують поведінку cloud-системи за умови незмінності програмного коду cloud-сервісів, які формують програмну частину системи.

Здійснено навантажувальне тестування досліджуваної розподіленої гетерогенної інформаційно-телекомунікаційної системи, яка базується на cloud інфраструктурі. Параметри наведено у таблиці (Таблиця 2).

Таблиця 1. Результати проведених розрахунків доступності

Опрацьовані запити і-тою ланкою, зап/год	Середня доступність системи, %	Середня недоступність системи, %	Ефективна доступність системи
100	0.422	0.578	20.188
160	0.216	0.784	25.952
220	0.091	0.909	29.448
280	0.027	0.973	31.244
360	0.001	0.999	31.972
380	0.000125	1	31.996

У процесі навантажувального тестування використано розроблений програмний сервіс системи навантажувального тестування, запропоновані моделі корпоративного клієнта та спільної cloud-інфраструктури.

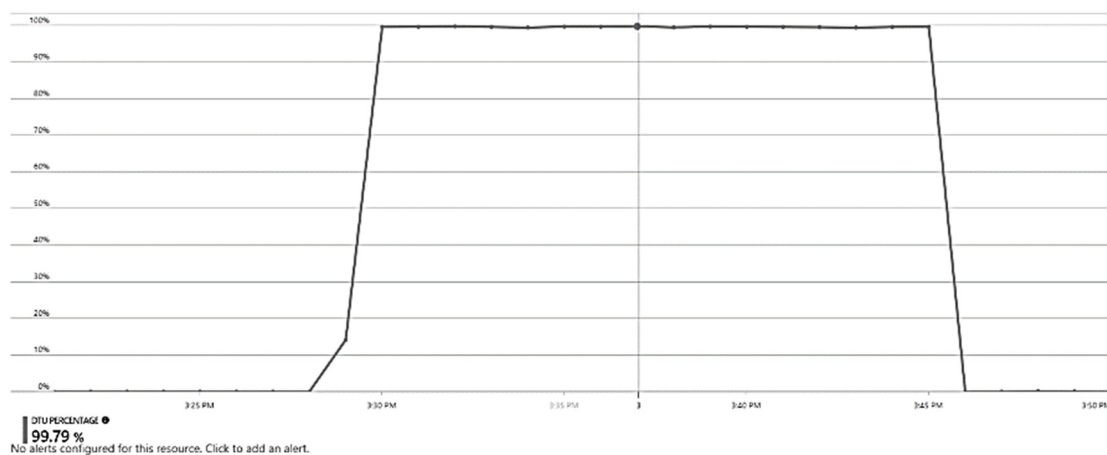
За результати навантажувального тестування виявлено вузьке місце у досліджуваній системі, а також отримано оцінки використання інфраструктурних компонентів системи (Рис. 29) і метрики якості обслуговування та якості сприйняття послуг користувачами досліджуваної ІТС (Рис. 30).

Показано, що оновлення програмного коду системи робить неможливим розроблення та використання імітаційних універсальних моделей системи у цілому, оскільки навіть незначні зміни програмного коду, який логічно поєднує компоненти системи, призводить до зміни поведінки системи, що не може бути враховано як у аналітичній, так і у імітаційній моделях.

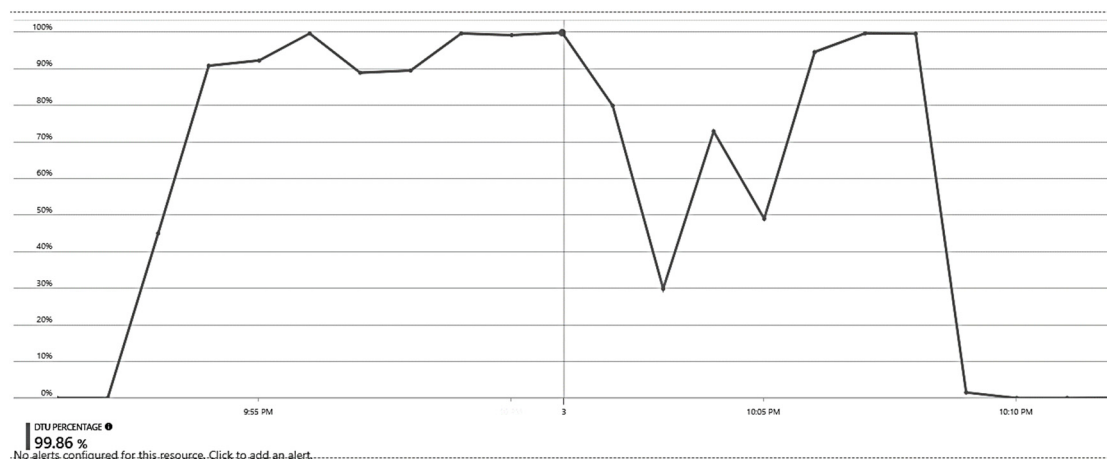
У зв'язку з цим, запропонована методика дослідження розподілених гетерогенних інформаційно-телекомунікаційних систем на базі cloud-інфраструктури є важливим інструментом у процесі їх проектування та експлуатації.

Таблиця 2. Параметри навантажувального тестування досліджуваної розподіленої інформаційно-телекомунікаційної системи

№ з/п	Максимальна кількість користувачів у системі	Тривалість процесу,	Початкова кількість віртуальних користувачів	Крок збільшення, с	Обсяг збільшення користувачів	Холодний старт	Середній час відгуку сервера, с	Максимальний час відгуку сервера, с	Масштабування системи	Збої зафіксовано на кількості	Статус експерименту
1	5000	15	10	5	10	Ні	3,66	11,7	Реалізовано вручну	5000	Невдача
2	5000	15	10	5	10	Ні	3,71	12,8	Реалізовано вручну	5000	Невдача



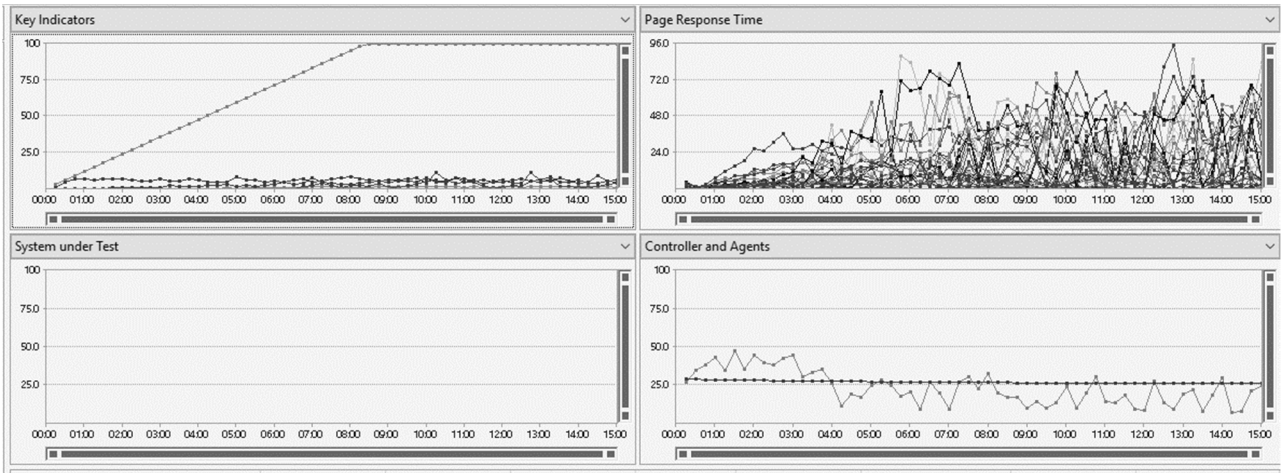
Експеримент 1



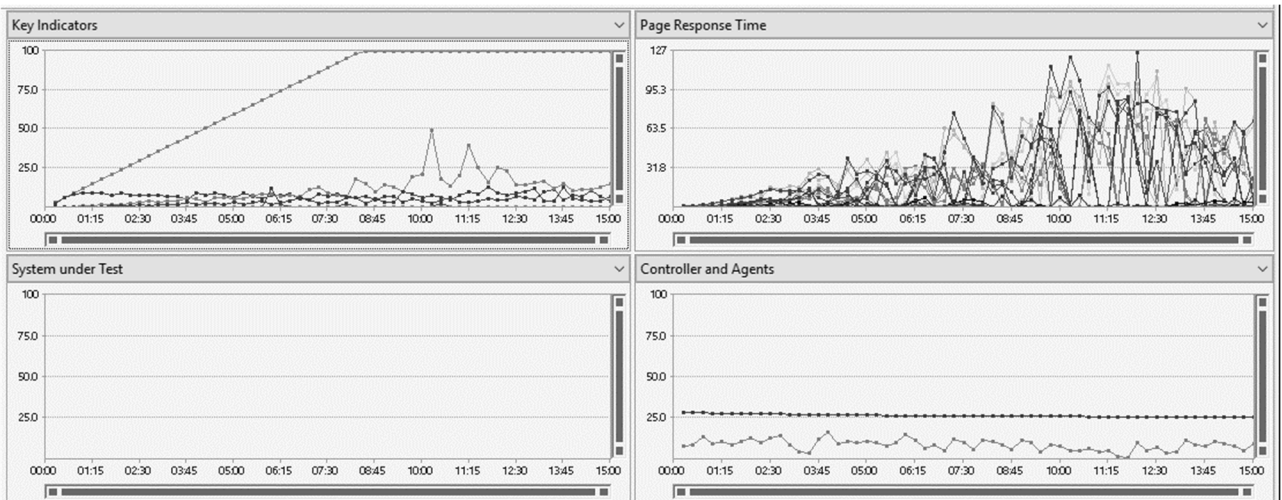
Експеримент 2

Рис. 29. Результати моніторингу завантаження бази даних корпоративного клієнта у процесі навантажувального тестування

Це дає змогу у цілому вирішити проблему гармонізації рівнів запропонованої концептуальної структури інформаційно-телекомунікаційних систем із покращенням значень метрик якості обслуговування та оптимальним розподілом ресурсів таких систем. Це свідчить про досягнення мети дисертації.



### Експеримент 1



### Експеримент 2

Рис. 30. Результати навантажувального тестування системи, яка реалізована на основі моделей спільної cloud-інфраструктури та корпоративного клієнта

Процес навантажувального тестування у двох експериментах охарактеризовано за допомогою діаграм, представлених на Рис. 31, Рис. 32.

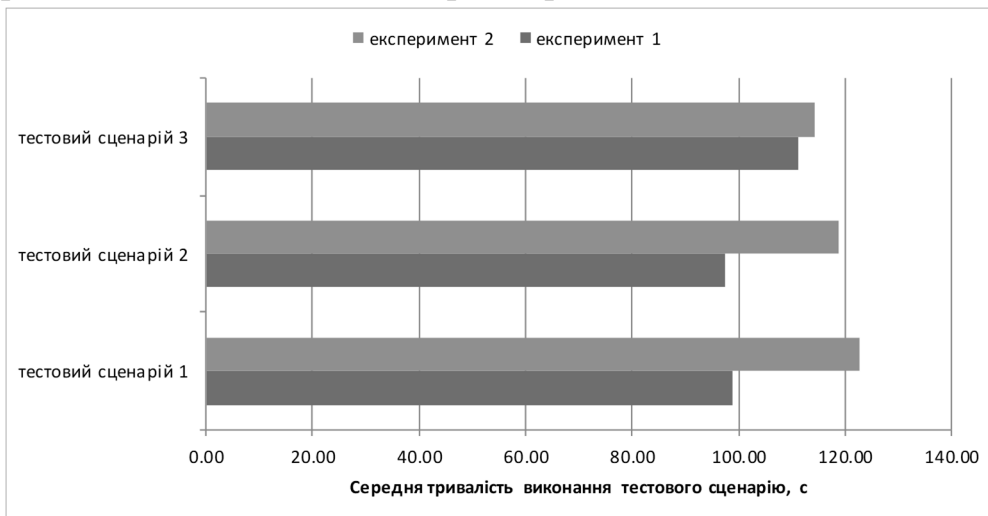


Рис. 31. Порівняння тривалості виконання тестових сценаріїв у двох експериментах

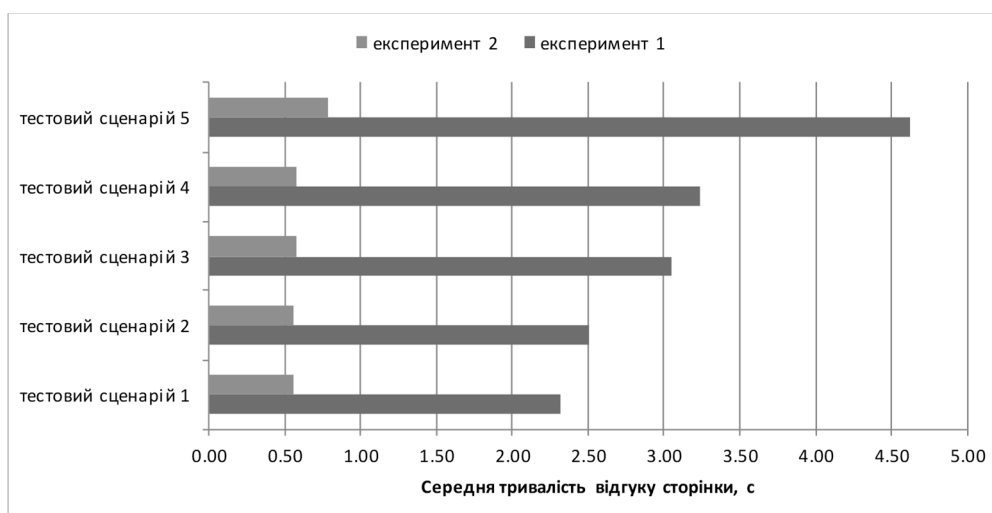


Рис. 32. Порівняння тривалості відгуку компонентів досліджуваної системи у двох експериментах

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну наукову проблему розроблення методів та моделей надання послуг у гетерогенних розподілених інформаційно-телекомунікаційних системах для підвищення якості обслуговування та покращення структурно-функціональних параметрів і характеристик цих систем з метою узгодження взаємодії сервісного шару та шару передавання даних.

Основні результати роботи такі:

1. Проаналізовано вплив системної архітектури розподілених гетерогенних інформаційно-телекомунікаційних систем на значення їх метрик якості, цілі розроблення архітектур та здійснено порівняння архітектурних шаблонів таких систем. Встановлено, що архітектура системи впливає на метрики якості надання послуг. Аналіз процесів комунікації з урахуванням рівня застосунків є основою для розв'язування завдань розроблення моделей компонентів інформаційно-телекомунікаційних систем та методів надання послуг в таких системах.

2. Запропоновано математичну модель пересилання запиту у процесі надання послуг у гетерогенних сервісно-орієнтованих системах із урахуванням вимог користувачів. Сформульовано завдання розподілу ресурсів таких систем між сервісними потоками як завдання нелінійної оптимізації. Його розв'язок базується на використанні методу розкладання на основі агрегації функцій корисності. Завдання розподілу ресурсів системи розв'язано для різнотипних послуг з урахуванням миттєвих значень функцій корисності кожної послуги. На основі територіально-залежної моделі проведено моделювання поведінки абонентів у інформаційно-телекомунікаційній системі з урахуванням їх активності та переміщення з мінімізацією кількості точок присутності послуг.

3. Запропонований метод балансування навантаження з багатоетапним перемиканням точок присутності послуг збільшує доступність інформаційних ресурсів у періоди пікових навантажень на 14%. Ефективна конфігурація телекомунікаційної підсистеми надання послуг здійснена шляхом розрахунку необхідних параметрів для максимізації продуктивності інфраструктури та

забезпечення процесів передавання сервісних потоків з мінімальними затримками, що значно підвищує показники якості надання послуг розподіленої гетерогенної інформаційно-телекомунікаційної системи та унеможливорює відмову в обслуговуванні, коли кількість активних користувачів та їх вимоги різко зростають. Завдання забезпечення потоків даних достатнім рівнем сервісу розв'язано шляхом оптимального поєднання фізичної і логічної мережних структур.

4. Проведено дослідження конфігурацій мережних топологій на основі теорії графів із їх інтегральним оцінюванням за методом аналізу ієрархій. Отримані результати дають змогу оцінити ефективність вибору шляхів у досліджуваному варіанті структури та порівняти її з еквівалентними конфігураціями. У процесі вибору конфігурації топології телекомунікаційної мережі врахування інтегральної оцінки забезпечує підвищення ефективності функціонування протоколів динамічної маршрутизації. Завдання маршрутизації інформаційних потоків сформульоване і розв'язане із використанням методів алгебраїчної топології. Проведено дослідження телекомунікаційного каналу з підтримкою множини класів обслуговування. Проведено дослідження процесу обслуговування аудіо- та відеопотоків за трьох типів обслуговування і встановлено умови, за яких використання кожного із досліджених типів обслуговування є оптимальним. Запропоновано розв'язок завдання розподілу ресурсів між мережними сервісними потоками за умови рівноправної конкуренції за доступні фізичні ресурси для оцінки максимальної кількості клієнтів, які можуть використовувати послугу з різними рівнями якості обслуговування. Завдання сформульовано в термінах теорії графів і розв'язано методом лінійного програмування для заданого графа мережі. Результати свідчать, що у випадку формування логічної структури системи за протоколом RIP потоки в рівній конкуренції використовують всі доступні мережеві ресурси. У випадку OSPF використовуються не всі доступні фізичні ресурси, адже він оминає канали з мінімальною пропускнуою здатністю. Це дає змогу виявити надлишковість у фізичній структурі та зменшити вартість мережі, або ж підвищити її продуктивність через введення  $k$ -шляхової маршрутизації.

5. Розроблено нові моделі корпоративного клієнта інформаційно-комунікаційної системи надання послуг та спільної cloud-інфраструктури. Ці моделі відрізняються від відомих тим, що реалізовані у вигляді програмного коду, який, внаслідок ініціалізації його параметрами, дає змогу утворити як завгодно багато об'єктів, що представляють cloud-інфраструктуру. Вони використані у процесі навантажувального тестування як елементи інформаційно-телекомунікаційної системи надання послуг. Перевагою цього класу моделей є масштабованість, тобто додавання нових елементів інфраструктури або ж видалення існуючих реалізується зміною у програмному коді і повторною ініціалізацією об'єкта. Модель корпоративного клієнта базується на принципі функцій корисності, який сформульовано у другому розділі роботи. Модель спільної cloud-інфраструктури дає змогу представити спільну мультиклієнтську інфраструктуру у вигляді ініціалізованого параметрами програмного об'єкта, який поєднано із клієнтським програмним об'єктом. Разом із логікою надання

послуг ці дві моделі формують розподілену гетерогенну інформаційно-телекомунікаційну систему надання послуг, поведінка якої під впливом користувачького навантаження досліджена у шостому розділі роботи.

6. Розроблено та досліджено систему інформаційної безпеки ІТС як IaaS-послугу розподіленої гетерогенної інформаційно-телекомунікаційної системи. Проведено моделювання атакуючих впливів на інформаційні ресурси до та після застосування заходів захисту. Результати показують зниження ефекту від впливу атак на інформаційно-телекомунікаційну систему до 90%. Для підтвердження адекватності результатів проведено дослідження процесу реальної мережної атаки. Встановлено, що запропонована система функціонує втричі ефективніше. Досліджено процес відновлення інфраструктури після катастрофи. Оцінено тривалість післяаварійного відновлення в випадку ручного та автоматичного відновлення на основі концепції IaaS. Значення виграшу залежить від складності хмарної системи і в умовах виконаного дослідження відрізняється на порядок.

7. Запропоновано реалізацію системи безперервної інтеграції інформаційних сервісів для забезпечення високої якості та оновлення версій сервісу за допомогою системи керування версіями, статичного аналізу якості програмного коду, автоматизованого тестування та утворення виконуваних файлів. Запропоновано удосконалений метод повного впорядкованого групового розсилання, який забезпечує безперервність процесу синхронізації екземплярів бази даних за умови втрати повідомлення процесу-відправника шляхом обмеження часу очікування на відповідь від усіх процесів-адресатів. Це забезпечує зниження імовірності відмови сервісу. Для підтвердження адекватності розробленої моделі досліджено процес обслуговування інформаційних потоків апаратним маршрутизатором та програмним компонентом гетерогенної розподіленої інформаційно-телекомунікаційної системи. Максимальне відхилення затримки пакетів між програмним та апаратним компонентами знаходиться в межах 0,5 %. Доведено, що балансування навантаження за допомогою інтегрованої системи керування розгортанням інформаційних сервісів дає змогу зменшити тривалість обслуговування запитів у середньому до 3 разів. Для дослідження балансування потоків IPTV розроблено дворівневу марківську модель такого потоку на основі як просторової, так і часової кореляції в кодових послідовностях MPEG. Модель описує динаміку процесу зміни кадрів і груп зображень в потоці IPTV та дає змогу оцінити характер потоку у процесі балансування навантаження за методом Round Robin DNS. Для дослідження затримок обслуговування запитів у розподіленій системі з балансуванням навантаження розроблено модель пересилання запитів та виведено співвідношення для оцінки затримки у каналах зі змінною пропускною здатністю. Отримані результати дають змогу стверджувати, що зростання пропускної здатності каналу у 10 разів приводить до зниження затримки обслуговування запиту у середньому у 2,5 рази, що пояснюється обмеженнями методу балансування навантаження.

8. Запропоновано удосконалену тривірневу архітектуру інформаційно-телекомунікаційних систем із резервуванням, побудованих із застосуванням cloud-сервісів та геореплікації. Представлено концепцію локального кешування



вмісту баз даних із застосуванням принципу стано-незалежних серверів. Проведено дослідження доступності cloud-сервісів у інформаційно-телекомунікаційних системах із багатокомпонентною структурою cloud-інфраструктури. Отримано оцінки середньої та ефективної доступностей та їх залежності від обслуженого навантаження, а також кількості фізичних серверів у системі. Отримані результати характеризують поведінку cloud-системи за умови незмінності програмного коду cloud-сервісів, які формують програмну частину системи.

9. Проведено навантажувальне тестування досліджуваної розподіленої гетерогенної інформаційно-телекомунікаційної системи, яка базується на cloud-інфраструктурі. У процесі навантажувального тестування використано розроблений програмний сервіс системи навантажувального тестування, запропоновані моделі корпоративного клієнта та спільної cloud-інфраструктури. За результатами навантажувального тестування виявлено вузьке місце у досліджуваній системі, а також отримано оцінки використання інфраструктурних компонентів системи і метрики якості обслуговування та якості сприйняття послуг користувачами досліджуваної інформаційно-телекомунікаційної системи. Показано, що оновлення програмного коду системи робить неможливим розроблення та використання універсальних моделей системи, оскільки навіть незначні зміни програмного коду, який логічно поєднує компоненти системи, призводить до зміни її поведінки, що не може бути враховано ні у аналітичній, ні у імітаційній моделях. У зв'язку з цим, запропонована методика дослідження розподілених гетерогенних інформаційно-телекомунікаційних систем на базі cloud-інфраструктури є важливим інструментом у процесі їх проектування та експлуатації і дає змогу у цілому вирішити проблему гармонізації рівнів запропонованої концептуальної структури інформаційно-телекомунікаційних систем із покращенням значень метрик якості обслуговування та оптимальним розподілом ресурсів цих систем. Це свідчить про досягнення мети дисертації.

### **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

[1] B. Buhyl, P. Huskov, O. Lavriv, R. Bak, A. Luntovsky, “Maximization of Service Flows Rates as a Solution of Network Capacity Allocation Problem,” *Internet Things Eng. Appl.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–10, May 2018. (іноземне наукове періодичне видання з напрямку, ISSN 2371-8609(Print))

[2] P. Yatskiv, O. Lavriv, Z. Kharkhalis, V. Mosorov, and M. Niedźwiedziński, “Security. Provisions for Ensuring Telecommunication Networks’ Protection from Malicious Influences,” *Przedsiębiorczość i Zarządzanie*, vol. 17, no. 11, pp. 111–125, 2016. (іноземне наукове періодичне видання з напрямку, ISSN 1733-2486)

[3] Р. П. Кришталь, О. А. Лаврів, З. М. Хархаліс, “Удосконалення алгоритму повного групового розсилання у системах оброблення даних з розподіленою архітектурою,” *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”, серія “Радіоелектроніка та телекомунікації”,* №. 849, С. 241–247, 2016. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 0321-0499)

[4] Р. І. Бак, П. О. Гуськов, О. А. Лаврів, “Імітаційна макромодель поведінки абонентів у мережі коміркового зв’язку,” *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”, серія “Радіoeлектроніка та телекомунікації,”* №. 849, С. 274–284, 2016. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 0321-0499)

[5] M. Beshley, M. Seliuchenko, O. Lavriv, V. Chervenets, H. Kholiavka, M. Klymash, “Increasing the efficiency of real-time content delivery by improving the technology of priority assignment and processing of IP traffic,” *Smart Comput. Rev.*, vol. 5, no. 2, pp. 1–13, 2015. (електронне іноземне наукове періодичне видання з напрямку ISSN 2234-4624)

[6] O. Shpur, M. Klymash, M. Seliuchenko, B. Strykhaliuk, O. Lavriv, “Improving the Quality of Composite Services Through Improvement of Cloud Infrastructure Management,” *Int. J. Comput. Sci. Inf. Secur.*, vol. 13, no. 9, pp. 36–44, 2015. (іноземне наукове періодичне видання за напрямку ISSN 1947-5500)

[7] М. І. Бешлей, М. О. Селюченко, О. А. Лаврів, А. Р. Масюк, Г.В. Холявка, “Оцінка адекватності функціонування програмного маршрутизатора у процесі обслуговування мультимедійного трафіку,” *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”, серія “Радіoeлектроніка та телекомунікації,”* №. 818, С. 162–173, 2015. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 0321-0499)

[8] М. М. Климаш, Н. А. Al-Zayadi, О. А. Лаврів, “Improving Throughput Using Channel Quality Indicator in LTE Technology,” *Збірник наукових праць Донецького національного технічного університету, серія “Обчислювальна техніка та автоматизація,”* №. 1(26), С. 134–144, 2014. (наукове фахове видання ISSN 2075-4272)

[9] М. М. Климаш, М. І. Бешлей, Б. М. Стрихалюк, О. А. Лаврів, Г.В. Холявка, “Підвищення якості обслуговування в конвергентних мобільних системах на основі платформи UMA-A,” *Проблеми телекомунікацій,* №. 1(13), С. 3–19, 2014. (електронне наукове фахове видання, індексується МНБ РИНЦ ISSN 2220-6922)

[10] М. І. Бешлей, В. П. Ткачук, Б. А. Бугиль, О. А. Лаврів, “Модель системи динамічного управління пропускнуою здатністю каналу інтегрованої WI-FI/GSM мережі,” *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”, серія “Радіoeлектроніка та телекомунікації,”* №. 796, С. 83–96, 2014. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 0321-0499)

[11] Н. А. Al-Zayadi, М. М. Климаш, О. А. Лаврів, М. Al-Shuraifi, “Mobility Affected on Channel Estimation Using Different Modulation in LTE,” *Проблеми телекомунікацій,* no. 2(14), pp. 30–41, 2014. (електронне наукове фахове видання, індексується МНБ РИНЦ ISSN 2220-6922)

[12] O. Yaremko, B. Stryhalyuk, T. Maksymyuk, O. Lavriv, D. Kozhurov, “The optimal power control method in multiuser cellular networks,” *An Int. Q. J. Econ. Technol. New Technol. Model. Process.*, vol. 2, no. 1, pp. 63–67, 2013. (іноземне наукове періодичне видання за напрямом ISSN 2084–5715)

[13] Б. А. Бугиль, О. А. Лаврів, М. І. Бешлей, В. В. Червенець, “Методи оптимізації фізичної та логічної структур телекомунікаційних мереж,” *Вісник*

Національного університету “Львівська політехніка”, серія “Радіоелектроніка та телекомунікації,” №. 766, С. 76–81, 2013. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 0321-0499)

[14] І. М. Кузь, З. М. Хархаліс, П. О. Гуськов, О. А. Лаврів, “Дослідження методів частотного планування коміркових мереж на основі технологій LTE та GSM,” *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”, серія “Радіоелектроніка та телекомунікації,”* №. 766, С. 82–87, 2013. (наукове фахове видання, МНБ ІСІ, ISSN 0321-0499)

[15] Y. Nayali, O. Lavriv, B. Buhyl, R. Bak, M. Klymash, “Models and mechanisms for traffic balancing of IPTV VoD service,” *Int. J. Serv. Econ. Manag.*, vol. 5, no. 4, pp. 291–300, 2013. (іноземне наукове періодичне видання з напрямку ISSN print: 1753-0822)

[16] М. М. Климаш, Б. А. Бугиль, О. А. Лаврів, Т. В. Корецький, “Інтегральна оцінка ефективності вибору маршрутів передавання потоків даних для різних конфігурацій мережевих топологій,” *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”, серія “Радіоелектроніка та телекомунікації,”* №. 738, С. 95–99, 2012. (наукове фахове видання, ISSN 0321-0499)

[17] О. А. Лаврів, М. І. Бешлей, М. М. Гнатчук, А. В. Поліщук, “Модель системи управління ресурсами мультисервісних мереж в умовах самоподібності трафіку,” *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”, серія “Радіоелектроніка та телекомунікації,”* №. 738, С. 165–172, 2012. (наукове фахове видання, ISSN 0321-0499)

[18] М. М. Klymash, I. V. Demydov, O. A. Lavriv, Y. D. Dobush, “Analysis of service workflows distribution and service delivery platform parameters,” *Системи обробки інформації*, №. 6(104), С. 103–107, 2012. (наукове фахове видання, індексується МНБ РИНЦ, ISSN 1681-7710)

[19] О. А. Лаврів, М. І. Бешлей, Б. А. Бугиль, “Дослідження якості надання послуг абонентам мобільного зв’язку в IMS-мережі,” *Збірник наукових праць Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України*, № 65, С. 132–140, 2012. (наукове фахове видання, ISSN 2309-7655)

[20] Б. А. Бугиль, М. М. Климаш, О. А. Лаврів, І. В. Демидов, “Підвищення ефективності розподілу ресурсів телекомунікаційної мережі шляхом зміни маршрутів передавання даних,” *Проблеми телекомунікацій*, №. 4(9), С. 32–44, 2012. (електронне наукове фахове видання, індексується МНБ РИНЦ ISSN 2220-6922)

[21] M. Klymash, Y. Nayali, O. Lavriv, “Models and mechanisms of IPTV VoD Traffic Balancing,” *Comput. Probl. Electr. Eng.*, vol. 2, no. 2, pp. 41–45, 2012. (наукове видання з напрямку, МНБ ІСІ, ISSN 2224-0977)

[22] О.А. Лаврів, “Сервісно-орієнтоване планування ресурсів мультисервісної телекомунікаційної мережі,” *Збірник наукових праць Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України*, №. 62, С. 118–126, 2012. (наукове фахове видання, ISSN 2309-7655)

[23] M. Klymash, O. Lavriv, B. Buhil, "Service-oriented Resource Planning for Multiservice IP Networks," *Comput. Probl. Electr. Eng.*, vol. 2, no. 1, pp. 59–63, 2012. (наукове видання з напрямку, МНБ ICI, ISSN 2224-0977)

[24] М. Климаш, А. Ложковський, О. Лаврів, Р. Бак, "Графо-аналітичний підхід до порівняння ефективності систем безпроводного зв'язку," *Комп'ютерні технології друкарства*, №. 27, С. 189–193, 2012. (наукове фахове видання ISSN 2411-9210)

[25] М. М. Климаш, О. А. Лаврів, І. О. Кагало, Б. В. Коваль, Т. А. Максимюк, "Покращення параметрів радіоінтерфейсу LTE/HSPA," *Комп'ютерні технології друкарства*, №. 26, С. 130–137, 2011. (наукове фахове видання ISSN 2411-9210)

[26] Y. Nayali, M. Klymash, O. Lavriv, "Analysis of IPTV VoD Traffic Balancing Mechanisms," in *12 International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics*, 2013, pp. 140–142. (Scopus)

[27] М. М. Климаш, О. А. Лаврів, М. Бешлей, "Моделювання та прогнозування параметрів і структур мультисервісної мережі з диференційованим обслуговуванням послуг," в *VI Міжнародний науково-технічний симпозиум «Нові технології в телекомунікаціях»*, 2013, С. 28–31.

[28] М. М. Климаш, Б. А. Бугиль, О. А. Лаврів, "Дослідження ефективності топологій телекомунікаційних мереж на основі їх інтегральної оцінки за методом аналізу ієрархій," в *Сучасні інформаційно-комунікаційні технології COMINFO'2012*, 2012, С. 46–48.

[29] О. А. Лаврів, Б. А. Бугиль, І. Д. Орлевич, "Архітектура і програмна концепція телекомунікаційної платформи SDN – OPENFLOW," в *Науково-методична конференція "Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2012,"* 2012, С. 13–15.

[30] H. A. Al-Zayadi, O. Lavriv, M. Klymash, "QoE Estimation on the Basis of LTE Service Architecture," in *12th International Conference Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science Dedicated to the 170th Anniversary of Lviv Polytechnic National University*, 2014, pp. 590–592.

[31] М. І. Бешлей, О. А. Лаврів, Г. В. Холявка, "Дослідження методів побудови конвергентної мережі оператора мобільного зв'язку для надання послуг quad play," в *Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій*, 2014, С. 76–77.

[32] О. В. Красько та О. А. Лаврів, "Адаптація смуги пропускання в мережах NG-SDH/WDM," у *Всеукраїнська науково-практична конференція "Сучасні проблеми телекомунікацій та підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2014,"* 2014, С. 201–204.

[33] M. Seliuchenko, A. Kovalchuk, O. Lavriv, and M. Klymash, "Enhancing Reliability of Transport Software-Defined Networks Using Flow Table Mutual Reservation Method," in *12th International Conference Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science Dedicated to the 170th Anniversary of Lviv Polytechnic National University*, 2014, pp. 573–575.

[34] І. В. Демидов, О. А. Лаврів, О. М. Шпур, and М. О. Селюченко, "Доступність композитних застосувань у сервісно-орієнтованих системах," в

*Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах*, 2014, С. 119–122.

[35] З. М. Хархаліс and О. А. Лаврів, “Порівняльний аналіз методів побудови мультиоператорних мереж мобільного зв’язку,” *Всеукраїнська науково-практична конференція “Сучасні проблеми телекомунікацій та підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2013,”* 2013, С. 249–252.

[36] M. Klymash, M. Beshley, and O. Lavriv, “Model of Network Resources Management on the Basis of Services Priorities Association,” in *12 International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics*, 2013, pp. 164–166. (Scopus)

[37] O. Lavriv, I. Kahalo, and R. Kolodiy, “Application of NoSQL approach in data-centered network architectures: big data case,” in *2015 1st International Conference on Advanced Information and Communication Technologies-2015 (AICT’2015)*, 2015, pp. 103–105.

[38] О. А. Лаврів, З. М. Хархаліс, and В. Я. Мосоров, “Моделювання DDoS атаки на веб-сервер,” в *10-а Міжнародна науково-технічна конференція “Проблеми телекомунікацій – 2016”*, 2016, С. 348–351.

[39] M. Al-Shuraifi, H. Al-Zayadi, O. Lavriv, and M. Klymash, “Improving QoS in MAX C/I Scheduling Using Resource Allocation Type 1 of LTE,” in *13 International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics*, 2015, pp. 12–14. (Scopus)

[40] Д. В. Кожуров, О. А. Лаврів, and А. Р. Масюк, “Модель обміну керуючою інформацією в сервісно-орієнтованій Cloud-мережі,” в *Всеукраїнська науково-практична конференція “Сучасні проблеми телекомунікацій та підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2013,”* 2013, С. 105–108.

[41] О. А. Лаврів, Б. А. Бугиль, П. О. Гуськов, Р. Р. Баса, “Розподіл ємності телекомунікаційної мережі із максимізацією інтенсивності інформаційних потоків,” в *“Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах,”* 2016, С. 134–135.

[42] О. А. Лаврів, Б. М. Стрихалюк, О. М. Шпур, and Т. А. Максимюк, “Дистанційний моніторинг параметрів місця вчинення злочину з використанням мобільних технологій,” в *2015 1st International Conference on Advanced Information and Communication Technologies-2015 (AICT’2015)*, 2015, С. 67–69.

[43] Б. М. Стрихалюк, О. А. Лаврів, З. М. Хархаліс, “Проблематика розгортання SDP для операторів мобільного зв’язку на основі віртуалізованих мереж дата-центрів,” в *Всеукраїнська науково-практична конференція “Сучасні проблеми телекомунікацій та підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2014,”* 2014, С. 221–224.

[44] М. М. Климаш, М. О. Селюченко, О. А. Лаврів, “Забезпечення відмовостійкості багаторівневої ієрархії управління у програмно-керованих мережах,” в *Всеукраїнська науково-практична конференція “Сучасні проблеми телекомунікацій та підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2014,”* 2014, С. 225–228.

[45] O. Lavriv, M. Klymash, G. Grynkevych, O. Tkachenko, V. Vasylenko, “Method of cloud system disaster recovery based on ‘Infrastructure as a code’

concept,” in *14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, 2018, pp. 1139–1142. (Scopus)

[46] R. Bak, O. Lavriv, B. Koval, “Load balancing based on multi-hop handover for wireless cellular networks,” in *2017 IEEE 1st Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON 2017 - Proceedings*, 2017, pp. 1103–1106. (Scopus)

[47] O. Krasko, M. Klymash, O. Lavriv, “Data flows transmission models in converged optical access networks,” in *2015 2nd International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2015 - Conference Proceedings*, 2015, pp. 65–68. (Scopus)

[48] O. Lavriv, Z. Kharkhalis, B. Strykhaliuk, “Concept of intrusion detection system with implementation of topological sorting,” in *2017 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics, CADSM 2017 - Proceedings*, 2017, pp. 170–172. (Scopus)

[49] M. Seliuchenko, O. Lavriv, O. Panchenko, V. Pashkevych, “Enhanced multi-commodity flow model for QoS-aware routing in SDN,” in *2016 IEEE International Scientific Conference “Radio Electronics and Info Communications”, UkrMiCo 2016 - Conference Proceedings*, 2016, pp. 1–3. (Scopus)

[50] I. Demydov, O. Lavriv, Z. Kharkhalis, M. M. El-Hatri, “Concept of the migrating firewall to scalable cloud networks,” in *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science, Proceedings of the 13th International Conference on TCSET 2016*, 2016, pp. 643–645. (Scopus)

[51] P. Huskov, O. Lavriv, M. Klymash, “The concept of services assurance in heterogeneous service-oriented systems,” in *2016 3rd International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology, PIC S and T 2016 - Proceedings*, 2017, pp. 24–26. (Scopus)

[52] O. Lavriv, B. Buhyl, P. Huskov, R. Bak, “Heterogeneous network capacity distribution among service flows,” in *2017 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics, CADSM 2017 - Proceedings*, 2017, pp. 173–175. (Scopus)

[53] A. Masiuk, M. Beshley, O. Lavriv, Y. Deschynskiy, “Common radio resource management model for heterogeneous cellular networks,” in *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science, Proceedings of the 13th International Conference on TCSET 2016*, 2016, pp. 661–663. (Scopus)

[54] O. Lavriv, B. Buhyl, M. Klymash, G. Grynkevych, “Services continuous integration based on modern free infrastructure,” in *2017 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*, 2017, pp. 150–153. (Scopus)

[55] M. O. Seliuchenko, O. A. Lavriv, M. M. Klymash, “Analysis of load balancing methods for improving of utilization efficiency of hardware resources of distributed systems,” in *Microwave and Telecommunication Technology (CriMiCo), 2013 23rd International Crimean Conference*, 2013, pp. 515–516. (Scopus)

[56] H. Al-Zayadi, O. Lavriv, M. Klymash, A.-S. Mushtaq, "Increase throughput by expectation channel quality indicator," in *2014 First International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology*, 2014, pp. 120–121. (Scopus)

[57] M. Klymash, O. Lavriv, T. Maksymyuk, M. Beshley, "State of the art and further development of information and communication systems," in *2016 International Conference Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo)*, 2016, pp. 1–6. (Scopus)

## АНОТАЦІЯ

**Лаврів О.А. Методи та моделі надання послуг в гетерогенних розподілених інформаційно-телекомунікаційних системах. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі. – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2018.

Дисертація присвячена структурно-функціональному синтезу та наданню послуг в гетерогенних розподілених інформаційно-телекомунікаційних системах з метою покращення значень метрик якості надання послуг шляхом оптимізації структури та показників ефективності функціонування телекомунікаційної підсистеми, а також підвищення захищеності, відмовостійкості та зниження тривалості відновлення працездатності інформаційної підсистеми.

У роботі проведено аналіз процесу надання послуг в гетерогенних розподілених інформаційно-телекомунікаційних системах. Розроблено та удосконалено методи побудови та моделі гетерогенних розподілених інформаційно-телекомунікаційних систем. Запропоновано методи структурно-функціонального синтезу телекомунікаційної підсистеми інформаційно-телекомунікаційних систем. Удосконалено метод керування конфігурацією та забезпечення катастрофостійкості інформаційної підсистеми інформаційно-телекомунікаційних систем. Розроблено нові та покращено відомі моделі надання послуг в гетерогенних інформаційно-комунікаційних системах. Досліджено особливості побудови та поведінки складної інформаційно-телекомунікаційної системи під впливом зростання навантаження на підставі програмно-реалізованих моделей та експериментального методу дослідження.

За сукупністю та новизною отриманих результатів розв'язано актуальну наукову проблему розроблення методів та моделей надання послуг у гетерогенних розподілених інформаційно-телекомунікаційних системах для підвищення якості обслуговування та покращення структурно-функціональних параметрів і характеристик цих систем з метою узгодження взаємодії сервісного шару та шару передавання даних.

**Ключові слова:** розподілена гетерогенна інформаційно-телекомунікаційна система, балансування навантаження, якість надання послуг, навантажувальне тестування, cloud-інфраструктура, міжрівнева взаємодія.

**ABSTRACT**

**Lavriv O.A. Methods and models of service provision in heterogeneous distributed information and telecommunication systems. – On the rights of the manuscript.**

A thesis submitted in fulfilment of the Doctor of Engineering Science degree on specialty 05.12.02 – telecommunication systems and networks. – Lviv Polytechnic National University of Ministry for Education and Science of Ukraine, Lviv, 2018.

The thesis is dedicated to the aspects of structural and functional synthesis and the services provision in heterogeneous distributed information and telecommunication systems to improve the metrics of the service quality of delivery by optimizing the structure and indicators of the efficiency of the functioning of the telecommunication subsystem, as well as increasing the security, fault tolerance and reducing the duration of the recovery of the information subsystem.

The first chapter analyzes the influence of the system architecture of distributed heterogeneous information and telecommunication systems on their quality metrics. The processes of communication in distributed heterogeneous information-communication systems are analyzed, considering the application layer influence. The analysis performed is the basis for further implementation of the tasks of developing models of components of the investigated information and telecommunication systems and methods of providing services in such systems.

The second chapter of the thesis proposes a mathematical model for query forwarding in heterogeneous service-oriented systems. The problem of resources allocation of heterogeneous information and communication systems between service flows is stated. Based on the area-based model of service delivery, a set of user's coordinates was calculated, users are classified by a speed criterion, and that provides the centralizing service management under the overloads of network segments. The calculated parameters of communication processes allow to characterize the process of providing services in the system by calculating the losses probability and system availability. The proposed method of load balancing with multi-stage switching of service points increases the availability of information resources during periods of peak load by 14%. The task of providing data streams with satisfactory service is to optimally combine the physical and logical network structures.

The third chapter contains the research of configurations of network topologies based on the theory of graphs. The research of the architecture of a telecommunication channel supported by a set of service classes was performed. The solution of the resource allocation problem between network service flows is proposed in case of equal competition for available physical resources. The goal is to estimate the maximum number of clients who can use the service with different levels of service quality. The problem is formulated in graph theory terms and solved by the method of linear programming for a given network graph. The influence of the logical structure on the availability of network resources is investigated. The proposed method detects redundancy in the physical structure and reduces the cost of the network or changes the routing policy by introducing  $k$ -route routing through unused channels, and as a result – by increasing network performance.



The fourth chapter presents a new model of the corporate client of the information and communication system. A new model of shared cloud infrastructure has been developed. Both models are implemented as a software and allow to simulate the system performance without its actual building. The information security system as IaaS service in the telecommunication segment of the distributed heterogeneous information and telecommunication system was developed and investigated. The results show that the impact of attacks on the information and telecommunication system has been reduced by more than 90%. The process of infrastructure recovery after catastrophes based on manual and automatic activity is explored. We have estimated the recovery duration in the case of manual and automatic recovery based on the IaaS. The benefit ratio may be by an order.

The fifth chapter analyses the process of continuous integration and the architecture of its implementation. We offered the advanced method of fully ordered group communication, which keeps the synchronization process operational, even if the message of the sender process is lost. The adequacy of the software component model was verified by studying the routing of multiservice information flow with the hardware router and the software component of the heterogeneous distributed information and telecommunication system. We proved that load balancing in the integrated information service deployment management system could reduce the average duration of queries up to 3 times. We designed an IPTV streaming model. The comparative estimations of the delay are given, which allow to assert that the increase of the channel capacity by 10 times leads to up to 2,5 time decrease in the service delivery delay, which is explained by the restrictions of the load balancing method.

The sixth chapter of the thesis presents the methods for deploying cloud infrastructure based on the PaaS principle. The advanced three-layered architecture of information and telecommunication systems with is offered. The study of the of cloud services availability in information and telecommunication systems with multicomponent cloud infrastructure has been conducted. We performed the load testing of the distributed heterogeneous information and telecommunication system based on the cloud infrastructure. The results of load testing revealed a bottleneck in the system. We also simulated utilization of infrastructure components and metrics of service quality and quality of experience. It has been shown that updating of the system code makes it impossible to design and use universal models of the system, since even minor changes to the code which logically combine the components of the system leads to a change in the behavior of the system, which cannot be considered in both analytical and simulation models. In this regard, the proposed methodology for the investigation of distributed heterogeneous information and telecommunication systems based on cloud infrastructure is an important tool in their design and operation and allows solving the problem of harmonizing the levels of the proposed conceptual structure of information and telecommunication systems with improvement of service quality metrics and optimal distribution of resources of such systems. This indicates the achievement of the thesis objectives.

**Keywords:** distributed heterogeneous information and telecommunication system, load balancing, quality of service provision, load testing, cloud infrastructure, inter-level interaction.

## АННОТАЦИЯ

**Лаврив О.А. Методы и модели предоставления услуг в гетерогенных распределенных информационно-телекоммуникационных системах. – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.12.02 – телекоммуникационные системы и сети. – Национальный университет «Львівська політехніка» Министерства образования и науки Украины, Львов, 2018.

Диссертация посвящена структурно-функциональному синтезу и предоставлению услуг в гетерогенных распределенных информационно-телекоммуникационных системах с целью улучшения показателей качества предоставления услуг путем оптимизации структуры и показателей эффективности функционирования телекоммуникационной подсистемы, а также повышения защищенности, отказоустойчивости и снижения продолжительности восстановления работоспособности информационной подсистемы.

В работе проведен анализ процесса предоставления услуг в гетерогенных распределенных информационно-телекоммуникационных системах. Разработаны и усовершенствованы методы построения и модели гетерогенных распределенных информационно-телекоммуникационных систем. Предложены методы структурно-функционального синтеза телекоммуникационной подсистемы информационно-телекоммуникационных систем. Усовершенствован метод управления конфигурацией и обеспечения катастрофоустойчивости информационной подсистемы информационно-телекоммуникационных систем. Разработаны новые и улучшены известные модели предоставления услуг в гетерогенных информационно-коммуникационных системах. Исследованы особенности построения и поведения сложной информационно-телекоммуникационной системы под влиянием роста нагрузки на основании программно-реализованных моделей и экспериментального метода исследования.

**Ключевые слова:** распределенная гетерогенная информационно-телекоммуникационная система, балансировка нагрузки, качество предоставления услуг, нагрузочное тестирование, cloud-инфраструктура, межуровневое взаимодействие.