

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

РОМАНЧУК ВАСИЛЬ ІВАНОВИЧ

УДК 621.391

**МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ
МУЛЬТИСЕРВІСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ФУНКЦІОНАЛЬНО-
ОРІЄНТОВАНИХ КОРПОРАТИВНИХ МЕРЕЖ**

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
Ложковський Анатолій Григорович,
Одеська національна академія зв'язку ім. О.С.Попова,
завідувач кафедри комутаційних систем;

доктор технічних наук, професор,
Коляденко Юлія Юріївна,
Харківський національний університет радіоелектроніки,
професор кафедри інфокомунікаційної інженерії;

доктор технічних наук, доцент,
Отрох Сергій Іванович,
Державний університет телекомунікацій,
завідувач кафедри мобільних та відеоінформаційних
технологій.

Захист дисертації відбудеться “25” січня 2019 р. о 12⁰⁰ 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 “21” грудня 2018 р.

*Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради*



І.В. Демидов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Поточний етап розвитку сучасного суспільства характеризується все більш широким впровадженням інформаційно-комунікаційних систем і технологій. Основу інфокомунікацій формують телекомунікаційні системи та мережі, які забезпечують одночасне надання великої множини сервісів на базі однієї транспортної платформи. Результати проведеного аналізу сучасного стану телекомунікаційних технологій і основних протокольних рішень показали стрімку динаміку розвитку мереж наступного покоління (Next Generation Network, NGN) в напрямку створення високошвидкісних мультисервісних мереж нового покоління з можливістю функціональної адаптації під потреби користувачів, що пов'язано з необхідністю пошуку нових підходів до визначення їх фізичної та функціональної архітектури.

Незважаючи на випереджувальний розвиток технологій фізичного і каналного рівнів, реалізувати потенціал телекомунікаційної корпоративної мережі нового покоління в повному обсязі можливо лише за рахунок ефективного управління доступними мережними ресурсами в умовах зростання вимог до оперативності обміну інформацією. Основна проблема, що виникає при розв'язанні завдань розподілу мережних ресурсів та управління їх запасами, полягає у створенні ефективної і надійної системи підтримання необхідного рівня резервів, а також розподілу та перерозподілу певних ресурсів у межах ієрархії телекомунікаційної корпоративної системи. Саме тому вивчення структури й особливостей мережного трафіку в одному із її локальних сегментів може стати основою для розроблення підходів і алгоритмів автоматизації моніторингу і розподілу мережних ресурсів, алгоритмів безпеки й забезпечення ефективного функціонування новітніх прототипів програмованих мультисервісних мереж з високим рівнем доступності. Такі підходи повинні опиратись на удосконалені методи розподілу ресурсів, що володіють високою швидкістю, масштабованістю, гнучкістю, захищеністю, низькою операційною складністю та ресурсоемністю.

З огляду на особливу затребуваність забезпечення наскрізного (end-to-end) QoS на перше місце в архітектурі управління трафіком виходять рішення саме мережного рівня еталонної моделі взаємодії відкритих систем. Серед процесів мережного рівня важливу роль відіграють завдання управління чергами, тому що саме неефективне управління чергами в мережних пристроях призводить до неконтрольованого зростання затримок і рівня втрат пакетів. Як показав проведений аналіз, в сучасному мережному обладнанні реалізовано множини механізмів керування чергами як з точки зору їх формування та обслуговування (FIFO, PQ, CQ, WFQ, CB WFQ), так і запобігання перевантаженням (RED, WRED, ECN, SPD). Їх основною особливістю і ключовим недоліком є переважання ручних адміністративних налаштувань в процесі конфігурування мережного обладнання, що не дає змоги оперативно реагувати на зміну стану завантаженості маршрутизатора та мережі в цілому. У зв'язку з цим багато вітчизняних вчених, таких як Лемешко О.В., Глоба Л.С., Ложковський А.Г., Лісовий І.П., Беркман Л.Н., Толюпа С.В., Воропаєва В.Я., Євсєєва О.Ю. і зарубіжних Abdelwahab M. Elnaka, Xining Li K., Park, B. Ryu, V. Paxson, R. Mondragon активно працюють над удосконаленням засобів управління мережним трафіком і забезпечення якості

обслуговування в телекомунікаційних системах, зокрема – і в напрямку перегляду моделей, методів і самих механізмів управління чергами на маршрутизаторах телекомунікаційної мережі.

В основному, більшість робіт, які присвячені методам оптимізації ефективності використання мережних ресурсів, носять теоретичний характер, пов'язаний зі створенням нових алгоритмів обробки та формування трафіку, що робить їх важкореалізованими в реальній телекомунікаційній мережі. Іншим недоліком існуючих методів є використання комплексного підходу до управління інформаційними потоками без урахування особливостей кожного типу трафіку, що генерується різними мережними послугами. Відомі технічні методи управління трафіком у вузлах мережі, такі як шейпінг та полісінг є малоефективними при обробленні трафіку та забезпеченні гарантованої якості обслуговування.

Виходячи з існуючого **протиріччя** між можливостями сучасних систем управління якістю послуг і реальними потребами користувачів, орієнтованими на конкретні послуги, актуальною **науково-прикладною проблемою** є забезпечення якості надання інфокомунікаційних послуг шляхом покращення оперативності обміну інформацією в мультисервісних інформаційних функціонально-орієнтованих корпоративних мережах на основі створення методу адаптивного управління структурними параметрами мережних пристроїв та розвитку математичних моделей і алгоритмів обслуговування черг.

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», «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 тем «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), (2017–2019 рр.) № держреєстрації 0117U004449, а також госпдоговірної тематики «Проектування та впровадження локальної мережі передачі мультимедійних даних на базі Ethernet технологій» (2016р.), ГД № 0548.

Мета і завдання дослідження. Метою представленої дисертаційної роботи є підвищення якості сервісу та ефективності використання ресурсів мультисервісних інформаційних функціонально-орієнтованих корпоративних мереж шляхом

розроблення адаптивних методів віртуалізації мережних пристроїв та алгоритмів динамічного управління мережними ресурсами.

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

1. Аналіз розвитку мереж нового покоління та огляд відомих математичних моделей і методів управління ресурсами мультисервісних інформаційних функціонально-орієнтованих корпоративних мереж;
2. Формалізація завдання адаптивного структурно-функціонального синтезу логічної інфраструктури корпоративної мережі;
3. Удосконалення методу управління чергами на інтерфейсах мережеских вузлів;
4. Розроблення структурно-функціональної моделі статичної та динамічної віртуалізації обчислювальних ресурсів мережного пристрою;
5. Розроблення методу декомпозиції структури мережного маршрутизатора з віртуалізацією;
6. Розроблення методу виявлення аномалій мережевого трафіку корпоративної мережі;
7. Моделювання та дослідження впливу процесу управління мережними ресурсами на якість обслуговування інформаційних послуг;
8. Розроблення програмно-апаратної платформи мультисервісної корпоративної мережі з адаптивним конфігуруванням ресурсів;
9. Дослідження ефективності запропонованих рішень та розробка рекомендацій щодо практичного використання отриманих в роботі результатів в сучасних і перспективних телекомунікаційних мережах.

Об'єктом дослідження є процес адаптивного структурно-функціонального синтезу логічної інфраструктури корпоративної мережі.

Предмет дослідження: моделі, методи та алгоритми динамічного управління ресурсами мультисервісних функціонально-орієнтованих корпоративних мереж.

Методи дослідження. В процесі досліджень використано такі теоретичні засади, як теорія систем масового обслуговування, теорія оптимізації, теорія телекомунікаційних систем, теорія ієрархічних систем, математичного та імітаційного моделювання, метод експертних оцінок, основні положення теорії ймовірності та математичної статистики, теорії фрактальних процесів, методів лабораторного та натурального експерименту.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Удосконалено метод узгодженого балансування різнопріоритетного навантаження між чергами у призначених мережеских інтерфейсах телекомунікаційних вузлів шляхом встановлення пріоритетності його оброблення за принципами диференціації сервісів, який відрізняється від відомих урахуванням тривалості передавання й очікування пакетів для проведення обміну пакетами між чергами із різним пріоритетом, що дало змогу першочергово передавати пакети, які спізнюються, наслідком чого стає адаптація процесів обслуговування навантаження до змін станів мережеских вузлів, що дало змогу забезпечувати необхідні показники якості сервісу.

2. Набула подальшого розвитку структурно-функціональна модель мережного вузла, яка відрізняється від відомих урахуванням процесів статичної та динамічної віртуалізації обчислювальних ресурсів і дала змогу описати процес адаптивної віртуалізації маршрутизаторів із оптимізацією заданого рівня параметрів якості обслуговування для визначених типів інфокомунікаційних послуг відповідно до множин властивих їм вимог до забезпечення якості сервісу, а також підвищити загальну стійкість системи (корпоративної мережі) до кібератак шляхом ізолювання атакваної віртуальної машини.

3. Вперше запропоновано метод декомпозиції структури мережного маршрутизатора, який, на відміну від відомих, базується на структурно-функціональній моделі віртуалізації його ресурсів, який дав змогу зменшити флуктуації часових параметрів обслуговування різних видів трафіку, що виникають унаслідок коливань їх інтенсивності, а також підтримувати задані показники параметрів якості обслуговування та оцінювати ефективність застосування масштабованих мережних рішень корпоративного класу.

4. Вперше запропоновано метод виявлення аномалій мережного трафіку, який, на відміну від відомих, заснований на виконанні статистичного аналізу поведінкових залежностей і ентропії інтенсивності трафіку, що дало змогу забезпечити виявлення, блокування або фільтрацію небажаних інформаційних потоків в програмно-базованих корпоративних мережах.

5. Набула подальшого розвитку функціональна модель програмно-керованого маршрутизатора, яка, на відміну від раніше відомих, у процесі адаптивного вибору алгоритму обслуговування черг під час виникнення флуктуацій користувацького навантаження передбачає врахування накопиченої інформації щодо минулих рішень, що дало змогу зменшити характерні для мультисервісних мереж нового покоління коливання часових показників якості сервісу.

6. Набула подальшого розвитку модель програмного маршрутизатора, яка, на відміну від відомих, враховує особливості виділення ресурсів при самоорганізації віртуальних аналогів апаратних маршрутизаторів різної продуктивності, в залежності від функціонально-орієнтованого призначення корпоративних мереж, а також можливості автоматизованого відновлення їх працездатності і забезпечення заданого рівня якості обслуговування з мінімальними затратами мережних ресурсів, що дало змогу підвищити ефективність функціонування корпоративних мереж.

Практичне значення одержаних результатів. Основним практичним результатом дисертації, який одержаний на основі проведених теоретичних та практичних досліджень, є розвиток методики адаптивного структурно-функціонального синтезу логічної інфраструктури корпоративної мережі шляхом конфігурування її мережно-незалежних рівнів для забезпечення вимог до продуктивності мережної системи, якості обслуговування користувачів та оперативності доставки даних. Запропоновані методи дають змогу виявити потенційні вузькі місця в телекомунікаційній системі з метою її модернізації та сформулювати пропозиції щодо зміни програмної архітектури активного мережного (агрегуючого та комутаційного) обладнання. При цьому, протягом 2015-2017 років проведено трансформацію мультисервісної корпоративної мережі Національного університету «Львівська політехніка» «Polynet», одержано позитивний приріст по

продуктивності функціонування, показникам якості обслуговування, захищеності даних, забезпечено гнучкість управління ресурсами мережі без значних кошторисних затрат на модернізацію мережної інфраструктури.

У межах удосконаленої дисертантом методики використано наступні практичні особливості розроблених методів, моделей та алгоритмів:

1. Зменшено до 2 разів затримку обслуговування з кінця в кінець при наданні інфокомунікаційних послуг реального часу та забезпечено високий рівень якості сприйняття відеопотоку при втратах пакетів до 3% із застосуванням удосконаленого алгоритму зваженого кругового обслуговування черг у мережних вузлах мультисервісної мережі.

2. Покращено якість обслуговування критично важливих даних у корпоративній мережі за середньою затримкою на 18,8%, а для потоків, чутливих до втрат та нечутливих до затримок вдалося зменшити ймовірність втрат пакетів до 10 разів шляхом використання запропонованої моделі віртуалізації мережного вузла з адаптивним управлінням структурними параметрами віртуальних маршрутизаторів при збереженні одних і тих самих обсягів апаратних мережних ресурсів.

3. Запропоновано технологію динамічної віртуалізації мережевого пристрою, яка забезпечує можливість призначення мінімального обсягу мережних ресурсів для гарантування заданого рівня якості обслуговування та покращує часові показники якості обслуговування потокового трафіку в режимі реального часу до 25-30%.

4. Підвищено достовірність оцінювання оптимальної кількості віртуальних вузлів мультисервісної корпоративної мережі від 1,1 до 5,1 разів та прогнозування затримки обслуговування різномірного трафіку з кінця в кінець в умовах його флуктацій від 4 до 30 %, в залежності від цільового орієнтування мережної інфраструктури.

Наукові та практичні результати виконаних досліджень використані в навчальному процесі Національного університету «Львівська політехніка» для модернізації курсів лекцій з дисциплін «Телекомунікаційні та інформаційні мережі, ч.1», «Системне програмування інфокомунікацій»; для створення нових курсів лекцій з дисциплін «Розподілені сервісні системи та Cloud-технології», «Побудова та протоколи гетерогенних мереж мобільного зв'язку».

Основні результати дисертаційної роботи використано і впроваджено з метою підвищення параметрів якості обслуговування та гнучкості управління ресурсами в телекомунікаційних корпоративних мережах Національного університету «Львівська політехніка», ТОВ ВТФ «Контех», ТОВ «Телекомунікаційна компанія», ПП «Цифрові технології», що підтверджено актами впровадження. Результати роботи можуть застосовуватись при розробленні методів адаптивного управління ресурсами у спеціалізованих мультисервісних інфокомунікаційних мережах з високими вимогами щодо якості, оперативності і гарантованості обміну інформацією, зокрема – для системи використаних віртуалізованих і програмно-конфігурованих мережних пристроїв, а також у межах розвитку архітектури мереж наступного покоління.

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно. У працях, опублікованих у співавторстві,

внесок Романчука В.І. є вирішальним, зокрема авторів належать: у роботах [7, 9, 30, 47, 48] – розроблення моделі програмного маршрутизатора з автоматичним розгортанням віртуальних вузлів цільового призначення; у працях [24, 32, 35, 38] – модель віртуального маршрутизатора зі статичною та динамічною реконфігурацією ресурсів; у роботах [2-5, 17, 18, 27, 45, 46] – методи управління ресурсами в мультисервісних гетерогенних мережах; у працях [12, 14, 39] – дослідження імовірнісних властивостей трафіку корпоративної мультисервісної мережі; у праці [11] – метод виявлення аномалій мережевого трафіку; у роботах [31, 13, 16] – математичні моделі, результати моделювання та дослідження реалізацій концепції віртуалізації мережевих пристроїв; у роботах [5, 13, 20, 24, 26, 28, 33, 39, 43- 44] – дослідження процесу передавання потокового мультимедіа в корпоративних мережах із гарантуванням якості обслуговування; у роботах [8, 10, 29, 34-37] – розроблення модифікованого методу пріоритетного обслуговування черг у вузлах мультисервісної корпоративної мережі; у роботах [1, 6, 15, 19, 21-23, 40-42, 49] – моделі та методи управління ресурсами транспортних телекомунікаційних мереж.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові результати і положення дисертації представлені, доповідались та обговорені на 20-ти міжнародних і державних науково-технічних конференціях та наукових семінарах: Міжнародних науково-технічних конференціях «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії» (м. Львів-Славське, 2010, 2012, 2014, 2016, 2018 pp.); Міжнародних науково-технічних конференціях «Досвід розробки та застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці» (м. Львів-Поляна, 2015 pp.); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми телекомунікацій - 2016» ПТ-16 (м. Київ, 2016 pp.); Міжнародній конференції «Телекомунікаційні системи і технології» (м. Харків, 2011 p.); Науково-практичних конференціях «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2011, 2012, 2014» (м. Львів, 2012, 2013 pp.); Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасні інформаційно-телекомунікаційні технології» (м. Київ, 2015); The 2015 Second International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T) (Kharkiv, Ukraine, 2015); Міжнародній конференції з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки IEEE (UkrMiKo'2016/UkrMiCo'2016) (м. Київ, 2016 p.); 2nd International IEEE Conference on Advanced Information and Communication Technologies-2017 (м. Львів, 2015, 2017 pp.). 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 49 наукових праць, серед них статей у наукових фахових виданнях – 20 (всі статті у науковій періодиці, що входить до міжнародних науково-метричних баз різного рівня, включаючи Scopus, Index Copernicus, Google Scholar тощо), у збірниках матеріалів і тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій – 13, з них індексованих у науково-метричній базі Scopus – 12, також 2 патенти та 2 колективні монографії.

Структура та обсяг роботи. Робота складається з переліку умовних скорочень, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і 4

додатків. Загальний обсяг роботи складає 346 сторінок друкарського тексту, із них 11 сторінок вступу, 235 сторінок основного тексту, 169 рисунків, 20 таблиць, список використаних джерел із 252 найменувань, 4 додатки на 31 сторінці. Додатки містять обрані початкові коди та конфігурацію маршрутизатора, акти впровадження результатів дисертаційної роботи, а також список 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 функціонування та побудови мультисервісних інформаційних функціонально-орієнтованих корпоративних мереж» – містить огляд літературних джерел за темою дисертації в рамках проведення аналізу щодо побудови функціонально-орієнтованих корпоративних мереж. Розглянуто особливості еволюції, а також проблематику ефективного управління мережевими ресурсами різної технологічної реалізації.

В процесі аналізу принципів побудови і функціонування сучасних телекомунікаційних систем і мереж встановлено, що вони розвиваються по шляху вдосконалення NGN-рішень, заснованих на підтримці якості обслуговування. Велика кількість робіт по агрегації трафіку, оптимізації мережеских потоків, з питань досягнення максимальної завантаженості мережі присвячені розв'язанню різних завдань мережного управління, але при цьому не враховуються вимоги до транспортування інформаційних потоків, що пред'являються з боку бізнес-процесів. Розв'язання всього комплексу завдань адаптивного автоматичного керування потоками в умовах змін значущості бізнес-процесів складно реалізувати на основі реалізації управління за допомогою існуючих методів та мережеских технологій, оскільки зміна критеріїв оптимальності керуючих рішень вимагає постійного експертного та адміністративного втручання. Крім того, основним недоліком корпоративних мережеских систем є їх залежність від нижніх рівнів моделі OSI, не пов'язаних безпосередньо з підтримкою бізнес-процесів. Отримання необхідної якості обслуговування за рахунок централізованого управління досягається для кожного з визначених потоків, але при цьому фонові потоки з урахуванням переданої в них інформації можуть вимагати такої ж якості обслуговування, що і високопріоритетні. Це не дає змоги будувати системи управління мережами, що оптимізують завантаженість каналів зв'язку з урахуванням відомих пріоритетів інформаційних потоків і вимог до якості передавання, висунутих з боку бізнес-процесів. Показано, що в основному всі відомі засоби забезпечення якості обслуговування відносяться до локального керування трафіком та мережескими ресурсами. В їх основу покладено переважно децентралізовані алгоритми та механізми управління ресурсами, що реалізуються на окремих вузлах мережі. Варто також відмітити, що недоліком всіх описаних засобів управління чергами та

боротьби з перевантаженнями є реалізація статичної ручної стратегії розподілу каналних ресурсів, процес управління якими, не завжди адекватний профілю вхідного трафіку, оскільки не враховуються властивості потоку. Крім того, в процесі управління не координуються рішення, отримані на окремих мережових вузлах. Методи управління інформаційними потоками в сучасних мультисервісних мережах використовуються в рамках передових концепцій, таких як Traffic Engineering (TE), Active Network (AW), Network Engineering (NE) і реалізують підходи, що дають змогу усунути обмеження існуючих протокольних рішень щодо управління мережевими ресурсами. Для їх реалізації використовується той чи інший математичний апарат. Так в TE і AW основний акцент робиться на застосуванні мережних методів управління в поєднанні з методами математичного і динамічного програмування, в NE для потоків з великим ступенем агрегації застосовують апарат диференціальних інтегральних рівнянь. Вказані методи дають змогу забезпечити збалансоване завантаження телекомунікаційної мережі, підвищити її загальну продуктивність, проте не враховують імовірно-часові характеристики інтегральних потоків даних і потребують використання більш інформативних моделей. На основі проведеного аналізу можна зробити висновок про необхідність розроблення нових моделей і методів адаптивного управління потоками даних та мережними ресурсами, спрямованих на забезпечення ефективної роботи мультисервісної мережі. Як показав проведений аналіз, для підвищення рівня якості обслуговування та ефективного розподілу доступного мережного ресурсу до перспективних моделей управління ресурсами висувається ряд важливих вимог, до основних з яких варто віднести наступні:

1. Врахування потокової структури сучасного мережного трафіку, обумовленого за обсягами зростанням загального числа мультимедіа додатків в переліку інфокомунікаційних послуг;
2. Оптимізаційна постановка і розв'язання завдання управління чергами, пов'язана з необхідністю збалансованого використання доступного мережного (буферного і каналного) ресурсу;
3. Підтримка диференціації обслуговування пакетів на інтерфейсах маршрутизаторів телекомунікаційної мережі відповідно до їх QoS-вимог;
4. Реалізація динамічних стратегій управління чергами;
5. Забезпечення справедливості обслуговування пакетів одного і того ж потоку;
6. Підтримка розподілених рішень з управління чергами;
7. Простота алгоритмічно-програмної та апаратної реалізації;
8. Забезпечення узгодженого розв'язання наступних взаємопов'язаних інтерфейсних завдань (класифікація та маркування пакетів, створення та налаштування системи черг на інтерфейсі, агрегування потоків і розподіл пакетів по чергах інтерфейсу з урахуванням параметрів переданих потоків, вимог до якості обслуговування, характеристик створюваних черг і інтерфейсу в цілому, визначення порядку обслуговування черг, тобто встановлення черговості передавання пакетів з черг в канал зв'язку).

Таким чином, актуалізується проблематика адаптивного структурно-функціонального синтезу логічної інфраструктури корпоративної мережі

приймаючи до уваги цільове призначення бізнес-процесів, флюктуаційний характер та пікові значення інтенсивностей потокового навантаження різних типів, що в процесі динамічного програмного конфігурування ресурсів забезпечило б виконання вимог щодо продуктивності мережі, оперативності доставки даних і якості обслуговування користувачів.

У другому розділі роботи - «Моделі, методи і алгоритми підвищення якості обслуговування та гнучкості управління ресурсами мультисервісних інформаційних функціонально-орієнтованих корпоративних мереж» - формалізовано задачу адаптивного структурно-функціонального синтезу логічної корпоративної мережі. В основі композитної моделі інфраструктури лежить принцип поділу (декомпозиції) мережі на модулі (мережні пристрої та канали зв'язку). Отже, для оцінювання ефективності функціонування мультисервісної телекомунікаційної мережі за основу беруться такі параметри: середня тривалість передавання інформаційних повідомлень, продуктивність та завантаженість мережі; параметри надійності, вартості та інші. Таким чином, функція для оцінювання ефективності функціонування інформаційних корпоративних мереж є багатопараметричною, саме тому для простоти її розрахунку вибираються найбільш важливі несуперечливі показники.

Нехай $P = \{P^{(1)}, \dots, P^{(i)}, \dots, P^{(I)}\}$ – множина таких параметрів, $\dim P = I$, кожен з яких, в свою чергу, визначається сукупністю часткових параметрів:

$$P^{(i)} = \{P_1^{(i)}, \dots, P_j^{(i)}, \dots, P_{J_i}^{(i)}\},$$

$$\dim P^{(i)} = J_i; i = \overline{1, I}; j = \overline{1, J_i}. \quad (1)$$

Функція оцінювання ефективності функціонування мережевого пристрою функціонально-орієнтованої корпоративної мережі на підмножині параметрів записується у вигляді:

$$F = F(P_0), P_0 \subset P, \quad (2)$$

де P_0 – підмножина параметрів, які є критичними при функціонуванні інформаційної мережі.

Некритичні параметри з підмножини $P_{HK} = P \setminus P_0$, характеризуються за допомогою функції оцінювання:

$$F_k = F_k(P_0; P_{HK}), k = \overline{1, K}; \quad (3)$$

$$F(P_0) \rightarrow \sup, \quad (4)$$

при цьому оцінювання некритичних параметрів з P_{HK} визначають обмеження відповідного оптимізаційного завдання:

$$F_k(P_0; P_{HK}) \mathfrak{R} H_k, \quad (5)$$

де \mathfrak{R} - відношення, яке може бути як строгого, так і нестроого порядку і приймати значення з множини $\{\geq, \leq, >, <\}$; $k = \overline{1, K}$, H_k – гранична оцінка для k -го некритичного параметра. В більшості випадків для корпоративних мереж критичними є часові параметри якості обслуговування, і, крім цього, потрібно враховувати вимоги щодо: надійності, вартості, захищеності, пропускну здатності, стійкості до завад і т.д. Множина P визначається наступним чином:

$$P = \{P_1, P_2, P_3, P_4\}, \quad (6)$$

де P_1 – час затримки повідомлення, P_2 – час комутації, P_3 – розмір інформаційного повідомлення, P_4 – пропускна здатність каналів зв'язку.

Розглянемо процес оброблення інформаційних повідомлень у вузлах функціонально-орієнтованих корпоративних мереж. Для n -го інформаційного повідомлення ($n = \overline{1, N}$), що обробляється m -м каналом (K) мережі ($m = \overline{1, M}$) вводиться булева функція:

$$Q(n, m) = \begin{cases} 1, & \text{якщо канал } m \text{ обслуговує повідомлення } n; \\ 0, & \text{в протилежному випадку.} \end{cases} \quad (7)$$

Нехай:

$$P_1 = \{t_{n,m}^{(1)}\}; P_2 = \{t_{n,m}^{(k)}\}; P_3 = \{V_n\}; P_4 = \{C_{n,m}\}. \quad (8)$$

Крім цього, визначається обмеження на час доставки даних мультисервісної мережі – T_n і доступну пропускну здатність мережі – B_m .

Тоді узагальнений параметр ефективності функціонування інфраструктури відносно оперативності обміну інформацією в мультисервісних інформаційних функціонально-орієнтованих корпоративних мережах можна представити як сумарний час оброблення інформаційних повідомлень на фіксованому часовому інтервалі:

$$F(P_0) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N Q(n, m) \cdot (t_{n,m}^{(1)} + t_{n,m}^{(k)} + \frac{V_n}{C_{n,m}}). \quad (9)$$

Окремі параметри з множини P_1 , P_2 і P_4 залежать від вибору алгоритму обслуговування черг та апаратної продуктивності мережного пристрою S . Тоді критерієм вибору найбільш ефективного мережного пристрою є вимога мінімізації узагальненого параметра ефективності – сумарного часу оброблення інформаційних повідомлень за фіксований інтервал часу:

$$F(P_0, S) \xrightarrow{S} \min, \quad (10)$$

при обмеженнях, які накладаються характеристиками мережі:

$$\sum_{n=1}^N Q(m, n) \cdot C_{n,m}(S) \leq B_m, m = \overline{1, M}, \quad (11)$$

і обмеженнях, які накладають технічні характеристики відносно оперативності доставки повідомлень:

$$\sum_{m=1}^M Q(m, n) \cdot (t_{n,m}^{(3)}(S) + t_{n,m}^{(k)}(S) + \frac{V_n}{C_{n,m}(S)}) \leq T_n, n = \overline{1, N}. \quad (12)$$

Таким чином, для оцінювання ступеня ефективності передавання даних в процесі обслуговування черг в мережних пристроях корпоративної мережі наведено параметри і критерій ефективності передавання даних. Зокрема, в процесі розроблення методів адаптивного управління особливу увагу потрібно приділяти формуванню множини критичних і некритичних параметрів, які формують узагальнений критерій ефективності. Крім того, нелінійний характер змін деяких параметрів ефективності вимагає удосконалення методів та алгоритмів збалансованого використання доступного мережного (буферного і каналного) ресурсу для розв'язання відповідних оптимізаційних завдань.

Отже, у роботі *удосконалено метод узгодженого балансування різнопriorитетного навантаження* між чергами у відповідних мережних

інтерфейсах телекомунікаційних вузлів функціонально-орієнтованих корпоративних мереж. Для дослідження та моделювання завдань з обслуговування черг припустимо, що число агрегованих по класах або пріоритетах інформаційних потоків в мережі відоме і дорівнює M , що відповідає прийнятим на практиці рішенням в рамках відомих методів маркування пакетів у полях заголовків ToS, DSCP. Також приймемо до уваги, що максимальне число черг у мережевих пристроях також відоме і становить (N). Таким чином, позначимо через a_i ($i = 1, 2, \dots, M$) – інтенсивність вхідного трафіку i -го класу, який надходить на обслуговування мережним пристроєм. Крім цього, нехай b_j ($j = 1, 2, \dots, N$) – частина пропускної здатності вихідного каналу зв'язку, яка є виділеною для j -ї черги ($j = 1, \dots, N$), що є типовим для алгоритму CBWFQ. Одна з ключових відмінностей пропонованого рішення полягає в тому, що змінні b_j ($j = 1, \dots, N$) у нашому випадку матимуть змогу при можливості розраховуватись динамічно з контролем за часом перебування в черзі пріоритетних пакетів, адаптуючись до зміни стану мережного вузла, а не адміністративно, як, наприклад, в CBWFQ.

Під час управління чергами необхідно забезпечити виконання умови відсутності перевантаження каналу зв'язку в момент часу t :

$$\sum_{j=1}^N b_j(t) \leq b, \quad (13)$$

де b - пропускна здатність вихідного каналу зв'язку, $b_j(t)$ – частина пропускної здатності вихідного каналу зв'язку, яка є виділеною для j -ї черги в момент часу t ($j = 1, \dots, N$). Крім того, з метою запобігання перевантаженням мережного пристрою в момент часу t потрібно, щоб виконувалася наступна умова :

$$\sum_{i=1}^M a_i(t) \leq b. \quad (14)$$

Виконання умови (14) забезпечується шляхом превентивного обмеження інтенсивності вхідного трафіку, що поступає на мережний пристрій NGN, з метою не перевищення пропускної здатності вихідного каналу зв'язку. Ця функція на практиці виконується алгоритмами довільного раннього виявлення перевантаження та обмеження довжини черги RED і WRED. Забезпечити динамічний характер процесу обслуговування черг в рамках запропонованого алгоритму можна шляхом введення керуючої змінної x_{ij} , під якої розуміється частка i -го типу трафіку, що надходить для обслуговування в j -у чергу. Згідно із фізичним змістом x_{ij} , мають місце наступні умови:

$$x_{ij} \in \{ 0, 1 \} \quad (i=1, 2, \dots, M; \quad j=1, 2, \dots, N), \quad (15)$$

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} = 1 \quad (i=1, 2, \dots, M), \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^M a_i(t) \cdot x_{ij} \leq b_j(t) \leq b \quad (j=1, 2, \dots, N). \quad (17)$$

Виконання умови (17) гарантує відсутність втрат пакетів на досліджуваному мережному пристрої. Умова (17) вводиться для уникнення перевантаження за пропускною здатністю каналу зв'язку, що виділяється для передавання пакетів тієї чи іншої черги мережного пристрою в процесі управління ресурсами. У ході виконання умов (17) за рахунок непередбачуваної зміни характеру мережного

трафіку на вузлі виникають черги та пов'язані з ними затримки пакетів. Для забезпечення допустимих затримок у вузлах вибирають оптимальну загальну буферну ємність. На цьому етапі починають з'являтися проблеми щодо вибору оптимальних (відносно мінімальних затримок та втрат пакетів) ємностей мережних буферів. Таким чином, для кожної черги визначимо її поточну завантаженість і максимальну ємність, позначивши їх відповідно через n_j і n_j^{max} ($j = 1, \dots, N$). Запишемо умови запобігання перевантаженням окремих черг по їх пропускній здатності (17) з використання умови уникнення перевантаження черг по їх довжині. Загальний вигляд шуканих умов виглядатиме як:

$$n_j \leq n_j^{max} \quad (j=1,2, \dots, N), \quad (18)$$

і тепер завдання зводиться лише до вибору аналітичного виразу для розрахунку середньої довжини черги в процесі обслуговування пакетів у мережних вузлах.

При цьому кожному типу трафіку, а значить і кожній черзі, може відповідати своя модель обслуговування, не обов'язково відповідаючи типовій СМО з переліку існуючих варіантів їх реалізації. З точки зору забезпечення гарантій QoS за параметром середньої затримки в ряді випадків зручніше нерівність (18) замінити на умову

$$\tau_j \leq \tau_j^{max} \quad (j=1,2, \dots, N), \quad (19)$$

де середня затримка обслуговування в тій чи іншій черзі може бути розрахована за відомою середньою довжиною черги на основі формули Літтла для будь-якої СМО. Використання системи умов є актуальним у випадку, коли чисельні значення необхідної середньої затримки (як параметра QoS) нормовані по окремих ділянках мережі. Тоді в процесі управління чергами важливо не перевищити ці задані для окремо взятої пари вузлів каналу значення середньої затримки пакетів, що особливо характерно при розв'язанні завдань щодо забезпечення гарантованого QoS в рамках архітектурної моделі досліджуваної мережі.

В дисертаційній роботі представлено оригінальний алгоритм керування чергами інформаційних потоків, що базується на одному з відомих алгоритмів CBWFQ та запропонованому методі [23]. Розробка цього алгоритму полягає у забезпеченні максимальної доступності послуги високого пріоритету при збереженні ефективного розподілу мережних ресурсів між іншими потоками, який забезпечується зваженим механізмом кругового обслуговування черг. З метою забезпечення необхідної якості обслуговування інформації в мережевих пристроях вводиться контроль за тривалістю перебування в черзі пріоритетних пакетів. Для моделі маршрутизаторі із m пріоритетними групами запропонований алгоритм функціонуватиме аналогічно. Згідно пріоритетної групи інформаційних потоків формується m черг в мережному вузлі. Для кожного пакету у чергах різної пріоритетності фіксується тривалість їх перебування, якщо тривалість перебування в черзі є більшим ніж Δt_m дані пакети маркуються як прострочені та поступають в першу позицію найкоротшої менш пріоритетної черги. Такі кроки застосовуються для всіх пакетів, у яких прострочена тривалість перебування у черзі. Отже, розміри черг повинні бути такими, щоб виконувалась умова, що час який буде чекати пакет, що останній став в чергу, повинен бути не більше Δt_m^{max} , (тривалості максимальної

затримки трафіку p -ї пріоритетної групи), для знаходження кількості пакетів в черзі необхідно дотримуватись значення границі:

$$N_p(m) = \lim_{t_{N_p(m)} \rightarrow \Delta t_{m \max}} V_{process_m} \cdot t_{N_p(m)} = V_{process_m} \cdot \Delta t_{m \max}, \quad (20)$$

де $N_p(m)$ - кількість місць в черзі p -ї пріоритетної групи від загальної черги в мережному пристрої $t_{N_p(m)}$ - час оброблення обслуговуючим мережним пристроєм всіх $N_p(m)$ пакетів з черги p -ї пріоритетної групи, $V_{process_m}$ - швидкість обслуговування пакетів p -ї пріоритетної групи.

Наприклад, для пакетів відео трафіку

$$N_p(\text{video}) = \lim_{t_{N_p(\text{video})} \rightarrow \Delta t_{\text{video} \max}} V_{process_{\text{video}}} \cdot t_{N_p(\text{video})} = V_{process_{\text{video}}} \cdot \Delta t_{\text{video} \max}, \quad (21)$$

де $N_p(\text{video})$ - кількість місць у черзі відео трафіку.

Після встановлення розміру черги є потреба пояснити поведінку системи в загальному вигляді. Пакети ставляться у черги різної пріоритетності. Для пріоритетних пакетів вводяться інтервали часу Δt_m та $\Delta t_{m \max}$, на основі яких формується необхідні довжини черги. Відомо, що $\Delta t_m < \Delta t_{m \max}$. Пакети, що перебувають в черзі довше Δt_m маркуються простроченими (отримають мітку «lim»). Розрахувати місця у черзі для пакетів, які будуть простроченими можна за формулою:

$$N_p(m) = V_{process_m} \cdot \Delta t_m. \quad (22)$$

Відповідно всі пакети, що поступили на місця черг в інтервалі $[N_p(m), N_p^{\text{lim}}(m)]$, отримають мітку «lim» (прострочені). Якщо запропонувати перенесення цих пакетів одразу після їх надходження до черг низької пріоритетності, тоді збережеться цілісність завдання, суттєво спростяться розрахунки тривалості обслуговування, та зменшиться кількість втрачених пакетів з пріоритетних груп. Для боротьби з перевантаженнями за середнього та високого коефіцієнтів використання попередніх сегментів функціонально-орієнтованої мережі довжина черг різної пріоритетності не повинна перевищувати відповідно другого та першого порогів відкидання з дотриманням імовірності відкидання пакетів не вище заданого для кожного порога рівня. Для цього пропонується в коді DSCP динамічно встановлювати різні комбінації шляхом заміни 4-го, 5-го, 6-го бітів з різними порогоми відкидання пакетів. Якщо сусідні вузли мережі повідомляють про зростання коефіцієнта завантаження, то обслуговуючий пристрій даного вузла може прийняти рішення про відкидання пакетів при певному значенні повідомленого коефіцієнта завантаження, навіть якщо не досягнуті пороги відкидання пакетів буфера даного вузла.

На рис. 1 показана робота запропонованого алгоритму для системи з трьома чергами: відео потоків (Video), голосових потоків (Voice) та потоків Інтернет трафіку (Data). Група черг низької пріоритетності складається з черги Інтернет трафіку, тобто з черг непріоритетних пакетів або низькопріоритетних пакетів. Якщо Інтернет трафік класифікований деяким чином, і пакети різних класів Інтернет трафіку мають різні пріоритети, тоді всі або деякі з них можуть потрапити до групи

черг низької пріоритетності. В рамках даної роботи робиться припущення, що події пов'язані з потраплянням пакетів до однієї з черг групи низької пріоритетності вважаються рівноймовірними.

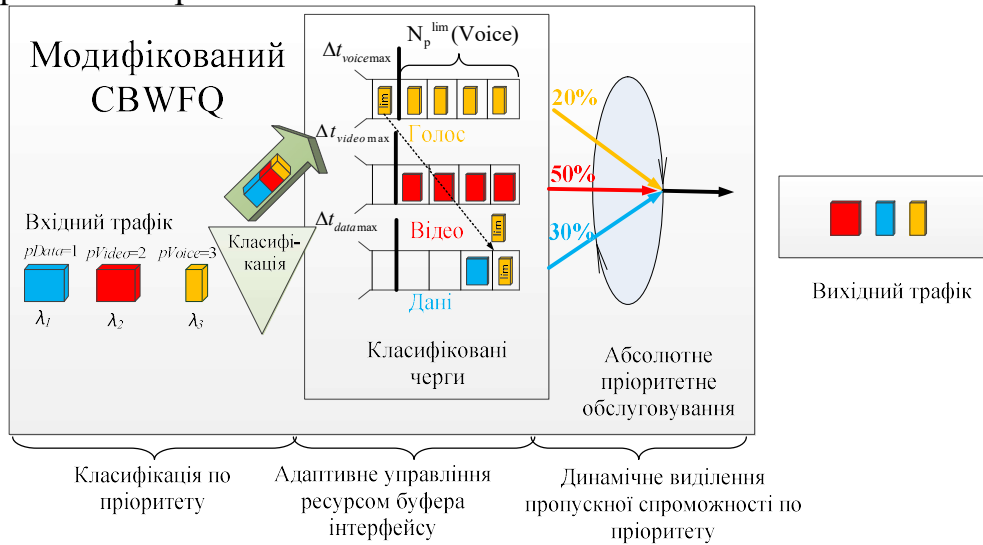


Рис.1. Модель системи оброблення інформаційних потоків за удосконаленим алгоритмом управління чергами M-CBWFQ у вузлах мережі [23]

Запропонована модель системи оброблення інформаційних потоків за удосконаленим алгоритмом управління чергами у вузлах корпоративної мережі дає змогу ефективно передавати пакети пріоритетних типів трафіку, при цьому не завдаючи суттєвої шкоди для процесів передавання непріоритетних потоків.

Також у роботі *набула подальшого розвитку структурно-функціональна модель мережного вузла зі статичною та динамічною віртуалізацією обчислювальних ресурсів*, яка дала змогу описати процес адаптивної віртуалізації маршрутизаторів з оптимізацією заданого рівня параметрів для визначених типів сервісу з набором властивих їм вимог до забезпечення якості обслуговування та підвищити загальну стійкість системи до кібератак. Віртуалізація мережного пристрою передбачає створення двох або більше віртуальних аналогів апаратних маршрутизаторів. Кожен із яких призначений для індивідуального обслуговування потоків одного типу з необхідним рівнем QoS згідно сформульованих вимог, шляхом зміни обчислювальних ресурсів CPU, RAM, Buffer capacity мережного пристрою. При такому проектуванні мережі підвищується стійкість мережі до кібератак, оскільки в умовах атаки на віртуалізований мережевий пристрій відбудеться перевантаження лише віртуального маршрутизатора, який обробляє замасковану під потік атаки. Новизною цієї моделі є те, що нею передбачено введення автоматизованого блоку менеджера управління ресурсами, який функціонально відповідає гіпервізору та, в залежності від технології віртуалізації, займає частину загальних ресурсів CPU [7,13, 38]. Даний блок в умовах флуктуацій трафіку динамічно виділяє обчислювальні ресурси мережного пристрою для віртуальних маршрутизаторів, в залежності від вимог QoS потоку. Під обчислювальними ресурсами пристрою розуміються апаратні ресурси CPU, RAM, Buffer capacity, конфігурація яких суттєво впливає на можливість і продуктивність виконання обробки пакетів мережним вузлом. Забезпечити динамічний характер процесу управління обчислювальними ресурсами в рамках запропонованої моделі

віртуалізації мережного пристрою можливо шляхом введення керуючих змінних $\langle x_i, y_i, z_i \rangle$, які відповідають за частку виділених обчислювальних ресурсів із загального пулу в процесі віртуалізації i -го віртуального маршрутизатора. Відповідно x_i описує Buffer capacity, y_i – CPU, z_i – RAM, n – кількість віртуальних маршрутизаторів. Згідно фізичного змісту $\langle x_i, y_i, z_i \rangle$ мають місце наступні умови:

$$x_i, y_i, z_i \in \{0, 1\}, \quad (23)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i = 1, \sum_{i=1}^n y_i = 1, \sum_{i=1}^n z_i = 1, \quad (24)$$

Очевидно, що сума довжин віртуальних черг, процесорної ємності та оперативної пам'яті віртуальних маршрутизаторів у критичному випадку не може перевищувати загального розміру буфера, процесора та оперативної пам'яті фізичного маршрутизатора без віртуалізації.

$$\sum_{i=1}^n x_i \cdot q_{черги_i} \leq Q_{буф}, \sum_{i=1}^n y_i \cdot CPU_i \leq CPU, \sum_{i=1}^n z_i \cdot RAM_i \leq RAM, \quad (25)$$

де $q_{черги_i}$ – довжина віртуальних черг пакетів; $Q_{буф}$ – обсяг буферної пам'яті; CPU_i – частота процесора i -го віртуального маршрутизатора; CPU – номінальна частота процесора фізичного маршрутизатора; CPU_i – частота процесора i -го віртуального маршрутизатора; RAM – оперативна пам'ять фізичного маршрутизатора; RAM_i – оперативна пам'ять i -го віртуального маршрутизатора.

$$\begin{cases} t_{поточне_i} \leq T_{допустиме_i} \\ p_{поточне_i} \leq P_{допустиме_i} \\ dt_{поточне_i} \leq dT_{допустиме_i} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x_i \cdot RAM_i \in RAM \\ y_i \cdot CPU_i \in CPU \\ z_i \cdot q_{черги_i} \in Q_{буф} \end{cases}, \quad (26)$$

де $t_{поточне_i}$ – поточна затримка буферизації потоку в i -ому віртуальному маршрутизаторі; $T_{допустиме_i}$ – допустима затримка потоку в i -ому віртуальному буфері маршрутизатора згідно встановлених рекомендацій; $p_{поточне_i}$ – імовірність відкидання пакетів в буфері i -го віртуального маршрутизатора; $P_{допустиме_i}$ – допустимі втрати потоку у i -ому віртуальному буфері маршрутизатора згідно встановлених рекомендацій; $dt_{поточне_i}$ – поточний джитер буферизації потоку в i -ому віртуальному маршрутизаторі; $dT_{допустиме_i}$ – допустимий джитер потоку у i -ому віртуальному буфері маршрутизатора згідно встановлених рекомендацій. Дослідження та детальна схема удосконаленої структурно-функціональної моделі маршрутизатора розглядатиметься у розділі 4 дисертаційної роботи.

У роботі запропоновано **метод декомпозиції структури мережного маршрутизатора** на основі теорії систем та мереж масового обслуговування, що дав змогу зменшити флуктуації часових параметрів обслуговування різних видів трафіку, які виникають через коливання їх інтенсивності із забезпеченням QoS. Мережний пристрій з віртуалізацією згідно теорії систем масового обслуговування (СМО) можна зобразити за допомогою каскадного включення буферної пам'яті, обслуговуючих пристроїв та менеджера ресурсів (гіпервізора) (рис. 2 а). Втрати продуктивності на обслуговування гіпервізора є невисокі, проте необхідно

врахувати вплив віртуалізації на продуктивність системи, в залежності від використаної технології віртуалізації в процесі проектування корпоративних мереж. Відповідно, на відміну від відомих підходів, у роботі здійснено удосконалення, а саме запропоновано використати коефіцієнт впливу віртуалізації на продуктивність системи κ . Поведінка трафіку мультисервісної IP-мережі характеризується різними законами розподілу і тому при віртуалізації мережного пристрою кожен віртуальний маршрутизатор працює зі своїм класом послуг, кожен з яких описується відповідною функцією розподілу інтервалів між пакетами та функцією розподілу тривалості обслуговування. Провівши декомпозицію моделі маршрутизатора з віртуалізацією (рис. 2 б) для одного типу трафіку отримаємо спрощену односерверну модель.

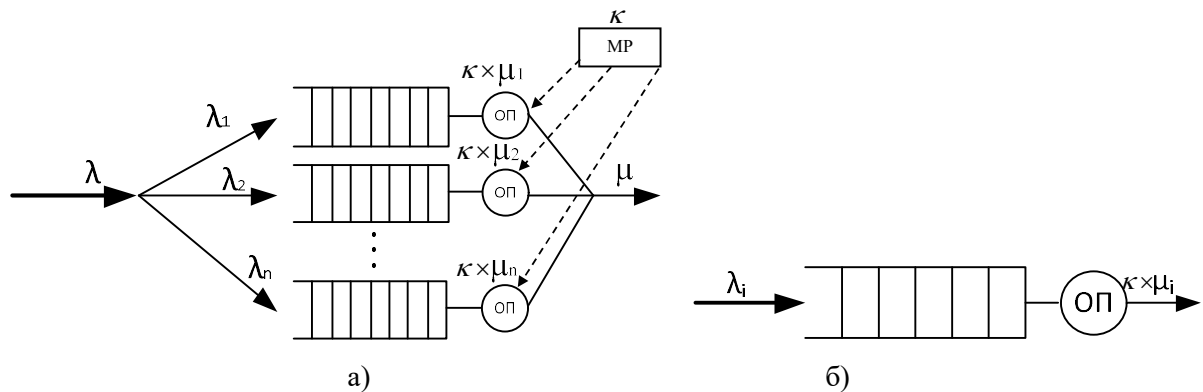


Рис. 2. Модель мережного пристрою з віртуалізацією (а) та модель віртуального маршрутизатора (б) [24]

Для опису такої моделі можна використати довільну систему масового обслуговування [24]. Для прикладу використаємо систему $M/M/1/n$, де на вхід поступають виклики з пуасонівським законом розподілу, при об'єднанні яких утворюється мультисервісний агрегований потік. Отже, для запропонованої системи $M/M/1/n$ ймовірність втрат в i -му віртуальному маршрутизаторі визначається:

$$P_{\text{втрати}} = \frac{\left(1 - \frac{\lambda_i}{\mu_i \cdot \kappa}\right) \cdot \frac{\lambda_i^{n_i}}{\mu_i \cdot \kappa}}{1 - \frac{\lambda_i^{n_i+1}}{\mu_i \cdot \kappa}}, \quad (27)$$

де λ_i – інтенсивність поступлення пакетів i -го потоку i -го віртуального маршрутизатора; μ_i – інтенсивність обслуговування пакетів i -го потоку i -го віртуального маршрутизатора; n_i – кількість місць в буфері i -го віртуального маршрутизатора.

Середня кількість пакетів в буфері i -го віртуального маршрутизатора :

$$\bar{N}_i = \frac{\frac{\lambda_i}{\mu_i \cdot \kappa}}{1 - \frac{\lambda_i^{n_i+1}}{\mu_i \cdot \kappa}} - \frac{(1 + n_i) \cdot \frac{\lambda_i^{n_i+1}}{\mu_i \cdot \kappa}}{1 - \frac{\lambda_i^{n_i+1}}{\mu_i \cdot \kappa}}, \quad (28)$$

відповідно середній час перебування пакета в i -му віртуальному маршрутизаторі можна визначити на основі формули Літгла:

$$\bar{T}_i = \frac{\bar{N}_i}{\lambda_i}. \quad (29)$$

$$\bar{T}_i = \left(\frac{\frac{\lambda_i}{\mu_i \cdot \kappa}}{1 - \frac{\lambda_i}{\mu_i \cdot \kappa}} - \frac{(1 + n_i) \cdot \frac{\lambda_i}{\mu_i \cdot \kappa}}{1 - \frac{\lambda_i}{\mu_i \cdot \kappa}} \right) \cdot \frac{\kappa}{\lambda_i}. \quad (30)$$

У роботі вперше запропоновано використати формулу Норроса для оцінювання кількості пакетів i – го потоку в буфері i – го віртуального маршрутизатора, де кожен потік характеризується своїми властивостями та власним параметром Херста:

$$N_i = \frac{\lambda_i}{\mu_i \cdot \kappa} \cdot \frac{\left(\frac{\lambda_i}{\mu_i \cdot \kappa} \right)^{\frac{H_i - 0.5}{1 - H_i}}}{\left(1 - \frac{\lambda_i}{\mu_i \cdot \kappa} \right)^{\frac{H_i}{1 - H_i}}}, \quad (31)$$

де H_i – параметр Херста i – го потоку, що надходить на i – й віртуальний маршрутизатор.

Потрібний обсяг пам'яті буфера віртуального маршрутизатора визначається за формулою:

$$Q_i = N_i \cdot L_{cp,i}, \quad (32)$$

де $L_{cp,i}$ – середня довжина пакету.

Отже, завдання планування ресурсів зводиться до вибору параметрів структурно-функціональної моделі вузла обслуговування, які забезпечують дотримання необхідних параметрів якості обслуговування для інформаційних функціонально-орієнтованих корпоративних мереж.

У роботі запропоновано удосконалено формулу Норроса для визначення середньої кількості пакетів певної послуги у буфері віртуального маршрутизатора [7, 24]. Запропоновано формулу визначення тривалості затримки пакетів послуги i -го пріоритету на всьому шляху передавання від джерела до адресата (34) та формулу визначення кількості віртуальних вузлів для забезпечення QoS (35).

$$t_i = \sum_{k=1}^M \tau_{ik} + \sum_{j=1}^N \sum_{m=0}^{i-1} \frac{\lambda_i}{\mu_i \cdot \kappa} \cdot \frac{\left(\frac{\lambda_i}{\mu_i \cdot \kappa} \right)^{\frac{H_i - 0.5}{1 - H_i}}}{\left(1 - \frac{\lambda_i}{\mu_i \cdot \kappa} \right)^{\frac{H_i}{1 - H_i}}} \cdot \frac{l_{cep(i-m)j} \cdot 8}{C_j}, \quad (33)$$

$$N_{вузлів} = \frac{T_{допустиме_i}}{\sum_{m=0}^{i-1} \frac{\lambda_i}{\mu_i \cdot \kappa} \cdot \frac{\left(\frac{\lambda_i}{\mu_i \cdot \kappa} \right)^{\frac{H_i - 0.5}{1 - H_i}}}{\left(1 - \frac{\lambda_i}{\mu_i \cdot \kappa} \right)^{\frac{H_i}{1 - H_i}}} \cdot \frac{l_{cep(i-m)j} \cdot 8}{C_j}}, \quad (34)$$

де: M – загальне число каналів зв'язку між двома абонентами сервісу; τ_{ik} – величина часу затримки розповсюдження пакету послуги i -го пріоритету по k -каналу зв'язку i – го віртуального маршрутизатора; C – пропускна здатність j -го каналу; $l_{сер.(i-m)j}$ – середня довжина пакету послуги i -го пріоритету в j -му віртуальному вузлі; N – загальне число мережних пристроїв з віртуалізацією ресурсів, розміщених між двома абонентами деякого сервісу.

Для підвищення захищеності корпоративної мережі та виявлення можливих каналів реалізації загроз передаванню інформації у роботі **запропоновано метод виявлення аномалій мережного трафіку**, який, на відміну від відомих, застосовує техніку аналізу, що базується на вивченні статистичних поведінкових залежностей і ентропії трафіку. Враховуючи аналіз структури та статистику, необхідно провести оцінювання трафіку кінцевого користувача з найбільшою кількістю активних сесій відносно зміни показника ентропії агрегованого трафіку. Для початку проводиться аналіз і визначається найбільш активний кінцевий користувач для IP-трафіку. На основі співвідношення кількості пакетів, які відправляються до конкретного сокета та загальної кількості пакетів за досліджуваній період отримується значення ймовірності надходження пакетів для кожної унікальної сесії протягом досліджуваного періоду:

$$p(x[i]) = \frac{U(x[i])}{Z_{sum}}, \quad (35)$$

де $U(x[i])$ – кількість пакетів $x[i]$ з певною адресою призначення, Z_{sum} – загальна кількість пакетів.

Маючи значення цієї ймовірності і обравши фактор нормалізації $\log(N[0])$, де $N[0]$ – це кількість унікальних адрес призначення, проводиться розрахунок ентропії:

$$H(x) = -\sum_{i=1}^n p(x_i) \log_b p(x_i), \quad (36)$$

де $H(x)$ – ентропія випадкової величини x , n – це кількість унікальних адрес призначення, $p(x_i)$ – ймовірність, що x набуде значення x_i , значення b для логарифму з (36) рівне 2. Розрахунок нормалізованої ентропії (значення в рамках

від 0 до 1) здійснюється за співвідношенням $\frac{H}{\log(N[0])}$. Маючи значення ентропії, можемо співставити його з кількістю «сумнівних» пакетів, наявних для даних сесій у кожному із випадків. Для одноразового експерименту розглянемо три файли аналізу даних користувачів. Відповідно, кількість сумнівних пакетів показано на рис. 3 б [11]. Таким чином, можна стверджувати, що перевищення порогових значень нормалізованої ентропії (див. рис. 3 а) є однією з ключових ознак присутності небажаної мережної активності щодо деякої IP-адреси.

Застосування цього методу дає змогу попередити можливі атаки на корпоративну мережу, оптимізувати витрати на захист інформації та контролювати поточний стан її захищеності.

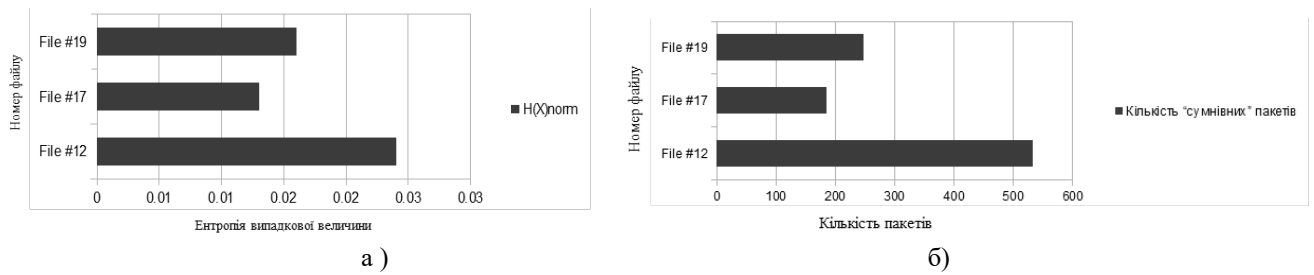


Рис. 3. Порівняння показників нормалізованої ентропії (а) і кількості «сумнівних» пакетів (повторної передачі, деформованих тощо) (б) [11]

Цей метод добре вписується у запропоновану концепцію віртуалізації мережних пристроїв так званих автоматизованих (програмно контрольованих мереж), які мають здатність до самоорганізації, відновлення і контролю незалежно від технологій, що використовуються для передавання інформації у мережі.

У третьому розділі - «Моделювання та дослідження впливу управління ресурсами мультисервісних корпоративних мереж на якість надання інфокомунікаційних послуг» - виконано дослідження, які показують, що на даний момент не існує універсальної технології QoS, здатної задовольнити одночасно всі вимоги для побудови мультисервісних мереж зв'язку. Для дослідження показників якості обслуговування інфокомунікаційних послуг триплету Triple Play побудована імітаційна модель, яка сконфігурована за різними розглянутими методами забезпечення QoS (рис. 4). Для побудови імітаційної моделі використовувалося програмне забезпечення OPNET Modeler 14.0 [40].

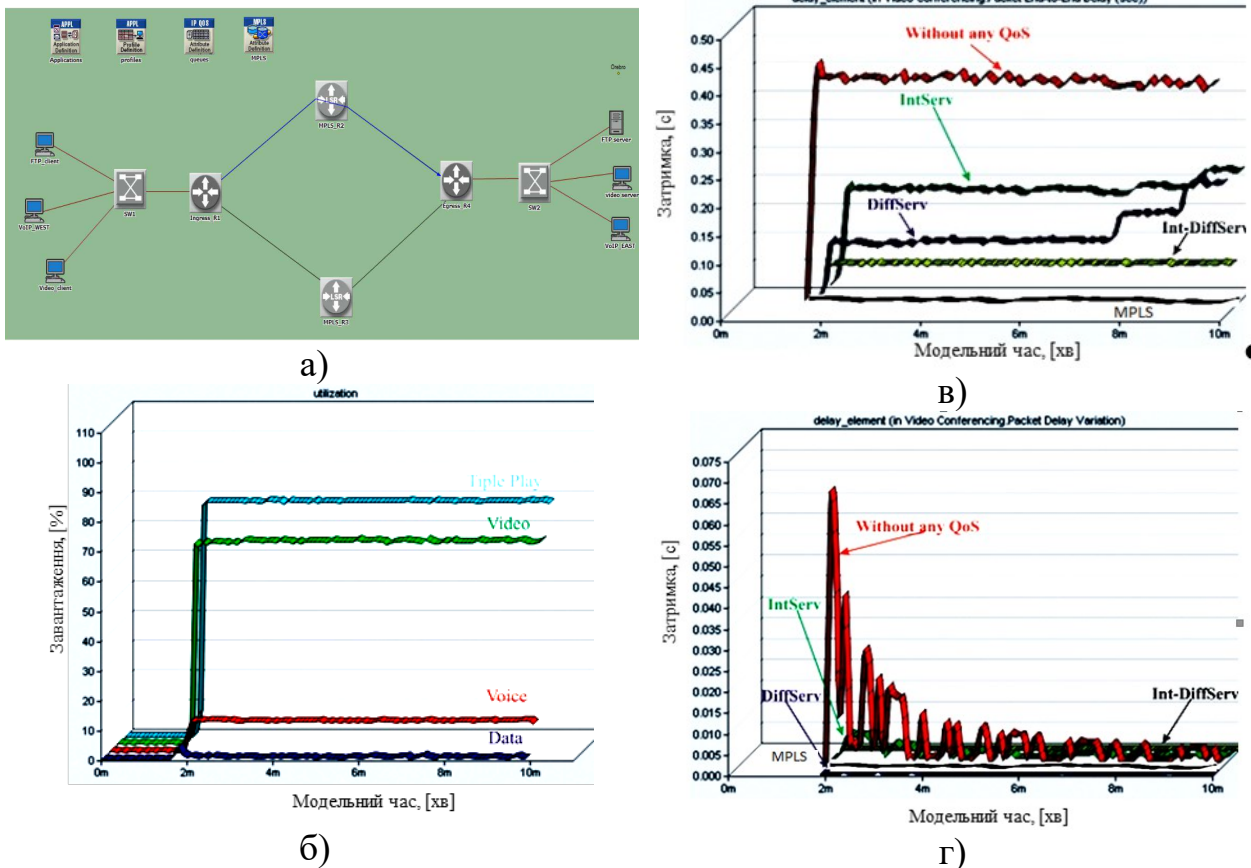


Рис.4. Структура моделі мультисервісної мережі а), використання пропускної здатності каналу б), затримка пакетів в) та джитер послуг відеоконференції г) [40]

Моделювання проводилося чотири рази: при відсутності гарантування якості обслуговування QoS та із наданням гарантованої якості обслуговування за

допомогою механізмів DiffServ, IntServ, Int-DiffServ, MPLS. Імітаційна модель підтвердила необхідність використання механізмів надання гарантованої якості обслуговування. Аналіз графіків, отриманих в результаті моделювання, показав, що найкращим механізмом надання гарантованої якості обслуговування є Int-DiffServ та MPLS. Проте, в умовах нестационарності потоків даних в мережі, інтенсивність яких в окремі періоди часу може суттєво перевищувати середньостатистичні значення, існуючі механізми не гарантують забезпечення якості обслуговування. Оскільки в пакетному трафіку різних мереж виявлено властивість самоподібності, виникло завдання побудови моделей, які могли б достатньо точно описати такий трафік та забезпечити збереження переданих даних або застосування вже відомих моделей для опису подібних видів трафіку. Відповідно, у роботі проведено дослідження основних параметрів трафіку мультисервісної мережі Національного університету “Львівська політехніка”, визначено ступінь самоподібності трафіка за допомогою RS методики, оцінивши параметр Херста, який становить 0,639. Для перевірки адекватності підбору теоретичного закону розподілу, відповідно до визначеного експериментальним шляхом, використано статистичні критерії узгодженості Колмогорова, Пірсона та Колмогорова-Смірнова, за якими найбільш адекватним є показниковий закон розподілу (рис.5) [12, 14, 39].

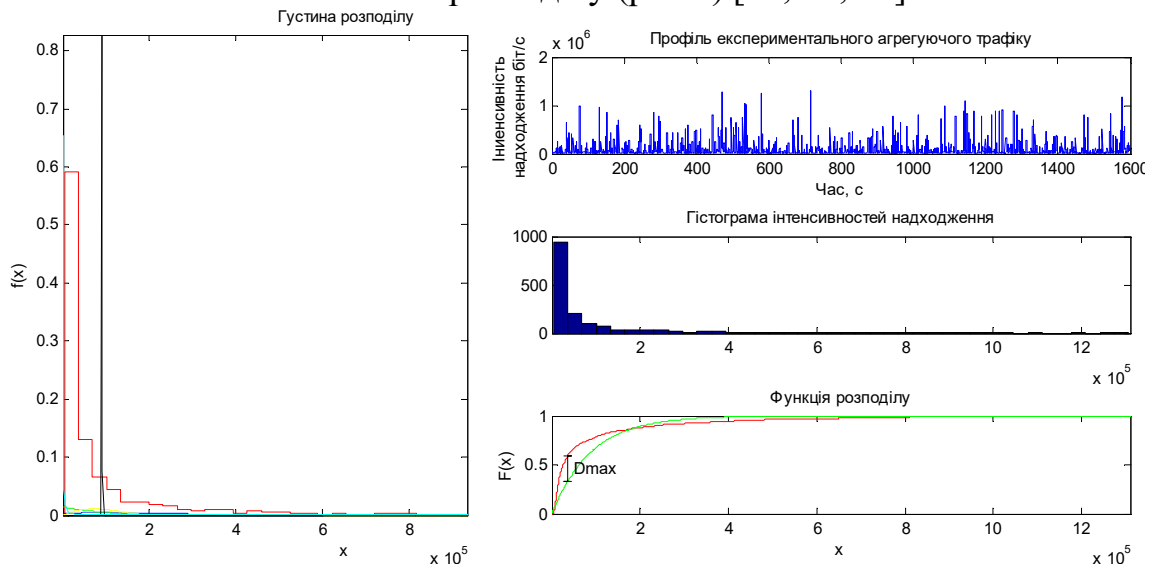


Рис. 5. Статистичний аналіз експериментального трафіку маршрутизатора рівня агрегації [10, 12]

Отриманий на основі імітаційної моделі результат обумовлений зафіксованими параметрами і характеристиками згенерованого трафіку, після цього завдяки отриманим статистичним даним від мережі НУ “ЛП” проведено покрокове вдосконалення імітаційної моделі з метою отримання результатів найвищого рівня адекватності. Для побудови моделі мережного вузла необхідно дослідити властивості окремо взятих реальних потоків. У роботі проведено практичний експеримент щодо визначення характеристик потоків відео, голосу та даних. Встановлено, що трафік голосу переважно передається малими розмірами пакетів, а такі послуги як відео та Інтернет-дані великими розмірами пакетів, що визначено на основі реальних даних за допомогою програми Wireshark. Виходячи із отриманих даних щодо досліджених потоків, розроблено імітаційну модель із реалізацією генерації потоків трафіку відповідних типів. На рис. 6 а показано блок-схему процесу імітаційного моделювання системи оброблення інформаційних потоків за

удосконаленим алгоритмом управління чергами у вузлах мультисервісної мережі. Вона складається із 10 етапів, які виконуються для досягнення мети щодо оцінювання ефективності запропонованих рішень стосовно забезпечення гарантованої якості обслуговування в корпоративних мережах. На рис. 6 б, в, г показано результати оцінювання ефективності застосування розроблених рішень, стосовно забезпечення необхідного рівня якості обслуговування [36]. Відповідно, проводилось моделювання та порівняння запропонованого модифікованого алгоритму CBWFQ із існуючим найбільш ефективним та використовуваним на практиці (Class Based Weighted Fair Queuing (CBWFQ)).

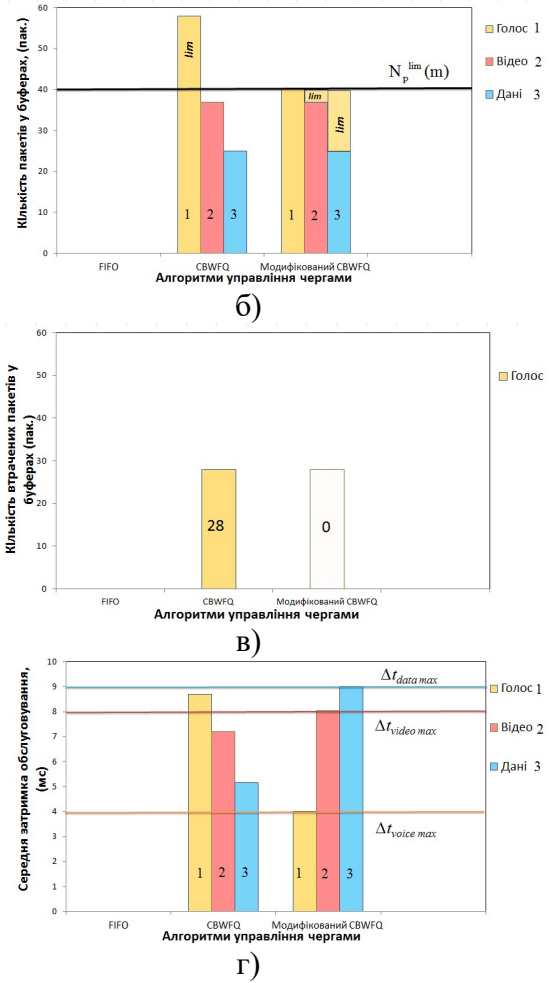
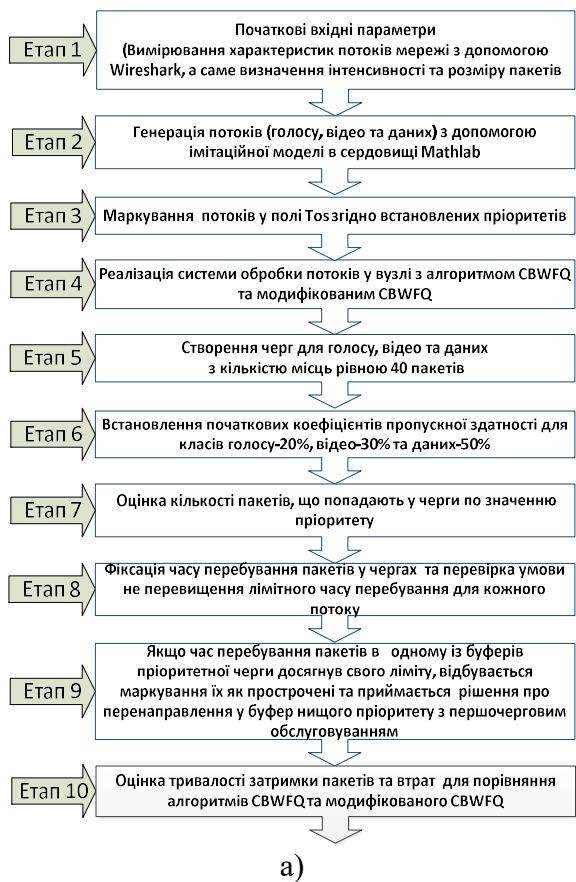


Рис. 6. Блок-схема етапів імітаційного моделювання а) та порівняння кількості пакетів у буфері б), втрачених пакетів в) їх середньої затримки г) для випадків здійснення обслуговування згідно модифікованого алгоритму CBWFQ, порівняно із існуючим CBWFQ [36]

Внаслідок застосування удосконаленого алгоритму та вище запропонованого методу обслуговування зменшується кількість пакетів у буфері голосового потоку до допустимого значення. А прострочені пакети надсилаються у вільно доступні черги нижчої пріоритетності із вищою пропускною здатністю, що, в свою чергу, приводить до зменшення втрат та середньої затримки обслуговування у вузлі NGN мережі до 2 разів.

В четвертому розділі роботи – «Дослідження ефективності функціонування мультисервісних корпоративних мереж з віртуалізацією маршрутизаторів» - для апробації запропонованої концепції віртуалізації мережевого пристрою і перевірки отриманих аналітичних залежностей побудовано дискретну стохастичну

імітаційну модель процесу функціонування маршрутизатора з віртуалізацією і складено план проведення експериментів за допомогою компонент SimEvents програмної системи Matlab. Модель маршрутизатора складається зі ступеневих блоків, які відповідають за функціонування певних елементів структури реального маршрутизатора. На рис. 7 створено структурно-функціональну схему моделі мережного пристрою, яка складається із трьох віртуальних маршрутизаторів (1,2,3) та стандартного маршрутизатора з пріоритетною дисципліною обслуговування пакетів PQ (4), на вхід яких поступає агрегований потік даних. Відповідно, маршрутизатор 1 – обслуговує відео трафік, маршрутизатор 2 – обслуговує голосовий трафік, маршрутизатор 3 – обслуговує дані та 4 – обслуговує Triple Play послуги.

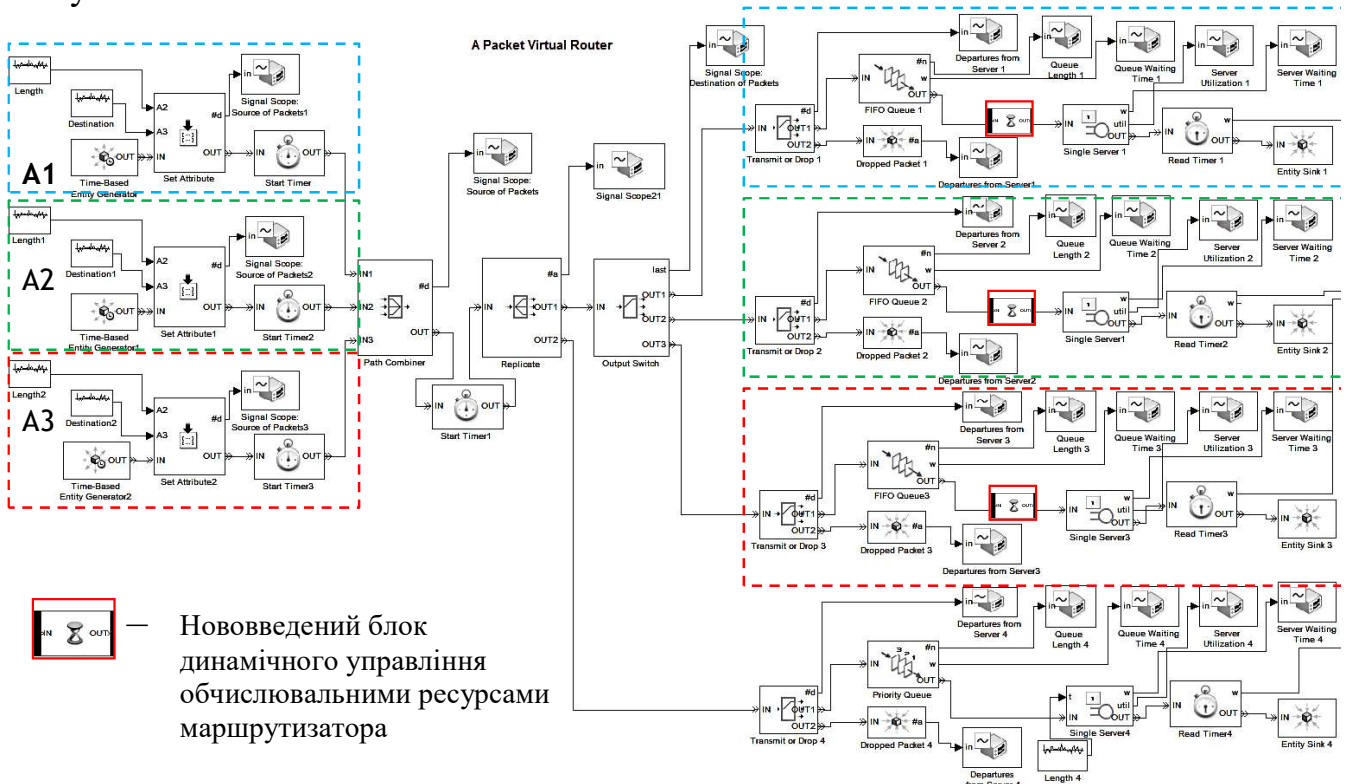


Рис. 7. Структурно-функціональна схема моделі маршрутизатора із динамічною віртуалізацією ресурсів (1,2,3) та без віртуалізації з пріоритетною обробкою черг (4) [13, 14, 32]

Також, в моделі потрібно врахувати, що при розгортанні віртуальних маршрутизаторів так само, як і при розгортанні віртуальних машин загальні ресурси оперативної пам'яті, CPU та буферної пам'яті діляться в залежності від кількості виділених незалежних машин (маршрутизаторів) та від статичної конфігурації пропорцій наданих у використання ресурсів. У моделі співставлено продуктивність маршрутизатора із витратами часу при обслуговуванні пакету або часу зайняття процесорного ресурсу. Оскільки номінальна частота процесора маршрутизатора є найбільш вагомим показником продуктивності, то шляхом експериментального дослідження визначено середній час обслуговування пакетів в маршрутизаторі в залежності від CPU табл. 1. Встановлено область ефективності функціонування віртуальних маршрутизаторів зі статичним виділенням ресурсів за критерієм мінімальної затримки, необхідної для забезпечення гарантованого рівня якості обслуговування. Проте, в умовах сплесковості трафіку, використання технології статичної віртуалізації мережного пристрою не здатне повністю забезпечити QoS за

критерієм мінімальної затримки, тому у роботі досліджено процес динамічної віртуалізації мережного пристрою.

Таблиця 1.

Залежність часу обслуговування пакетів від процесорної частоти маршрутизатора

CPU- процесора маршрутизатора (МГц)	Середній час оброблення пакетів (мкс)
1400	10
850	20
650	25
450	35

Встановлено, що динамічний розподіл обчислювальних ресурсів адаптується під інтенсивність вхідного потоку для забезпечення необхідного рівня QoS. В дисертаційній роботі проведено апробацію запропонованої структурно-функціональної моделі, яка дає змогу відповідно до заданих параметрів затримки та втрат пакетів вибрати оптимальні структурні параметри віртуальних систем обслуговування із гарантуванням необхідного QoS за означеними критеріями. Також можливо розв'язувати і обернене завдання. Такий підхід можна використати на етапі проектування, а також для підвищення ефективності функціонування реальної корпоративної мережі [13, 14, 32].

На рис. 8 показано результати прогнозування тривалості затримки пакетів послуги i -го пріоритету та кількості транзитних віртуальних вузлів в мережі, яка забезпечує мінімальний заданий рівень QoS при різних значеннях середнього коефіцієнта завантаження корпоративної мережі для трьох різних випадків її цільового призначення (функціонального орієнтування).

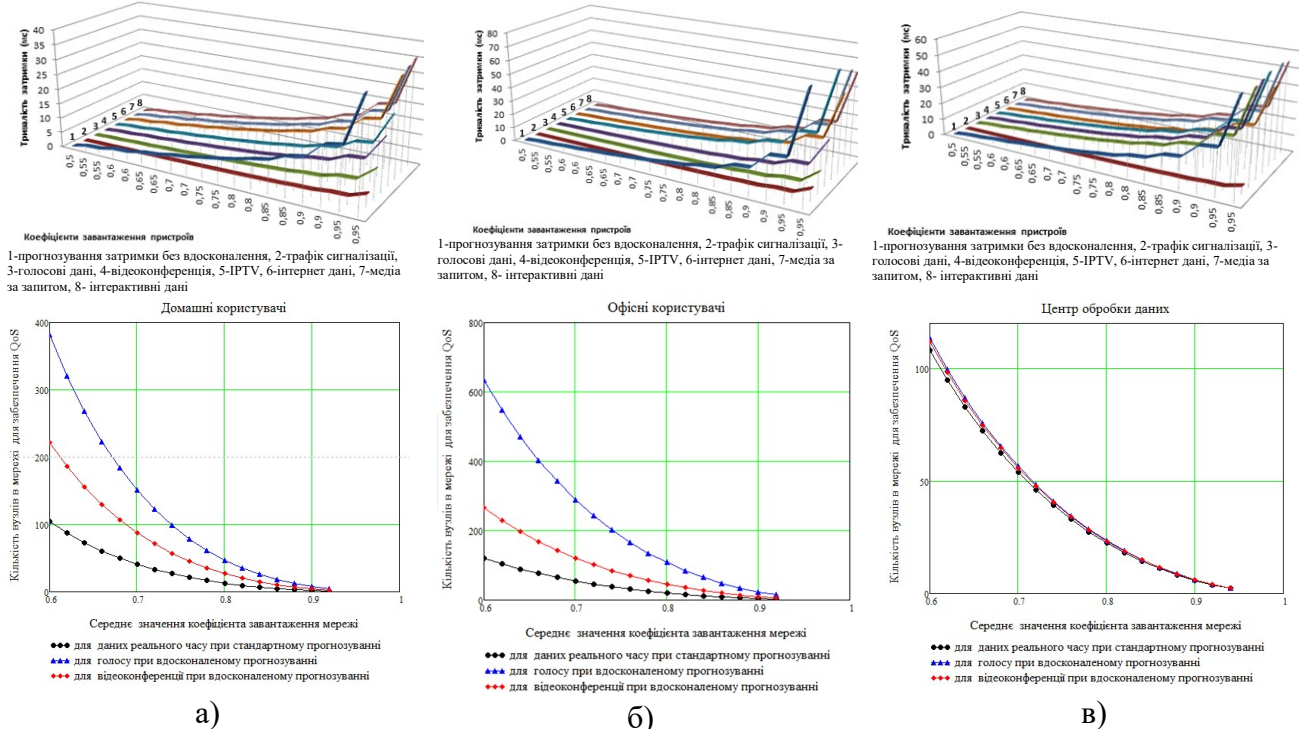


Рис. 8. Прогнозування тривалості затримки пакетів послуги i -го пріоритету та кількості віртуальних вузлів в мережі, яка забезпечує заданий рівень QoS для домашніх користувачів а), офісних користувачів б), та центру обробки даних в)

Визначено ефективність прогнозування із застосування вдосконалених формул (розділ 2 формули (33-34)). А саме, для голосових даних прогнозована допустима кількість транзитних вузлів збільшилась до 3,6 разів (після проходження яких

забезпечується допустима якість обслуговування), для сервісів відео конференцій – до 2.15 разів. Відповідно, для голосових даних трафіку, створюваних офісними користувачами прогнозована допустима кількість транзитних вузлів збільшилась до 5.28 разів, для відео конференцій – до 2.2 разів.

У п'ятому розділі – «Розроблення програмно-апаратного комплексу мультисервісної функціонально-орієнтованої корпоративної мережі із впровадженням програмних маршрутизаторів» – для практичної реалізації запропонованого методу управління чергами, у роботі створено віртуальну тестову платформу з використанням інструменту QtCreator (версія 5.2). У розробленій платформі, сокет відповідає фізичному порту справжнього мережного вузла. Таким чином, забезпечується абстракція від каналного рівня і вся увага зосереджується на обробленні даних на мережному рівні. Мережний протокольний стек, задіяний у розробленій тестовій платформі представлено на рис.9 а. Для того, щоб повністю абстрагуватися від каналного рівня, створено віртуальний IP-пакет, з яким можуть працювати вузли тестової платформи рис. 9 б [35].

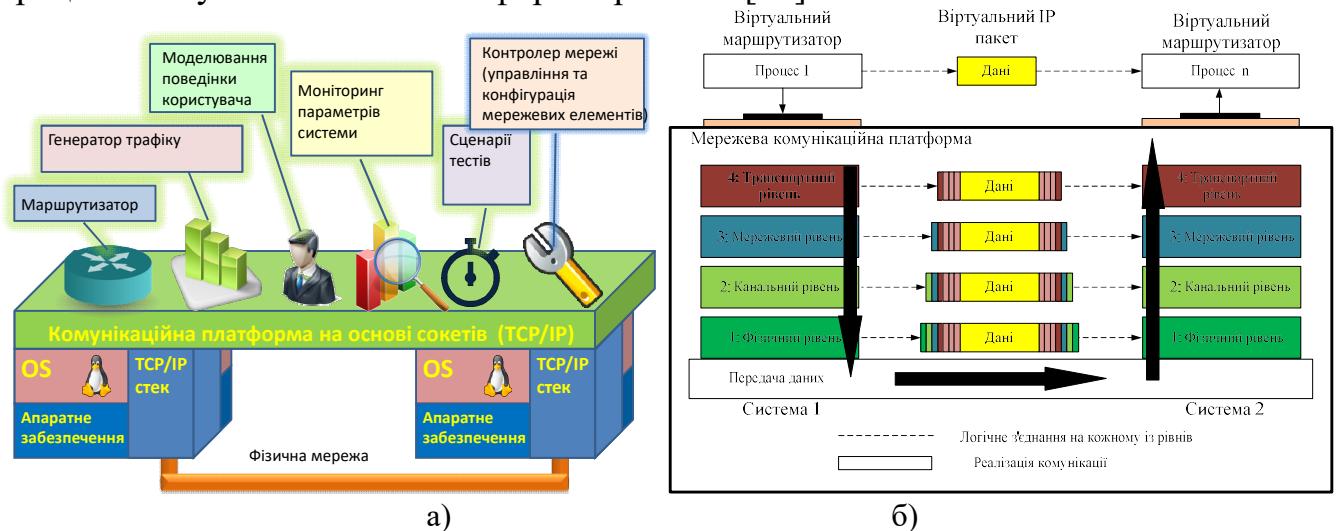


Рис.9. Мережний протокольний стек розробленої тестової платформи мережі нового покоління а) та організація процесу передавання віртуального IP-пакету б) [35]

На основі розробленої тестової платформи, *розроблено програмну модель IP-маршрутизатора* (далі VNR - віртуалізований мережний маршрутизатор), також розроблено генератор мережного трафіку. Проведено оцінювання адекватності функціонування розробленого програмного маршрутизатора його апаратному аналогу – маршрутизатору серії CISCO 2800 за розподілом тривалостей оброблення пакетів за умов їх проходження через декілька вузлів маршрутизації рис. 10 [10].

Функція густини ймовірності розподілу тривалостей затримок програмних маршрутизаторів наближається до функції густини ймовірності розподілу часових затримок, що створюються реальними маршрутизаторами (див. рис. 10 б).

Порівняння тривалостей оброблення пакетів апаратними та програмними маршрутизаторами показано в табл.2.

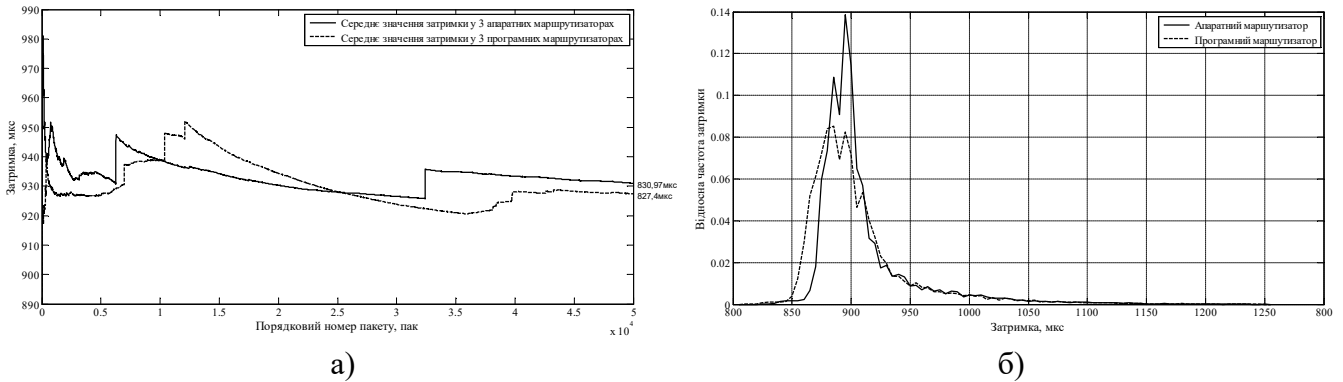


Рис.10. Порівняння середніх значень тривалостей оброблення пакетів (оброблених 3-ма програмними та апаратними маршрутизаторами) а) та густини розподілу ймовірностей тривалості оброблення пакетів 3- ма апаратними та 3-ма програмними маршрутизаторами б) [10]

Таблиця 2

Порівняння тривалостей оброблення пакетів апаратними та програмними маршрутизаторами, мкс

1 маршрутизатор (А)		2 маршрутизатори (А-В)		3 маршрутизатори (А-В-С)	
Апаратний	Програмний	Апаратний	Програмний	Апаратний	Програмний
695,9	693,4	805,4	803,3	930,9	927,4

Оцінювання середньої тривалості затримок пакетів апаратним маршрутизатором при проведенні 3-х експериментів (табл. 2) здійснюється згідно:

$$T_{cp} = \frac{(T_{(A-B)_2} - T_{(A)_1}) + (T_{(A-B-C)_3} - T_{(A-B)_2})}{2} \quad (37)$$

Підставивши отримані значення у формулу (37) отримаємо $T_{cp} = ((805.4 - 695.91) + (930.97-805.4))/2=117.53$ мкс.

Архітектура розробленого VNR, представлена на рис. 11, складається з об'єктів, що моделюють конкретні функції маршрутизатора.

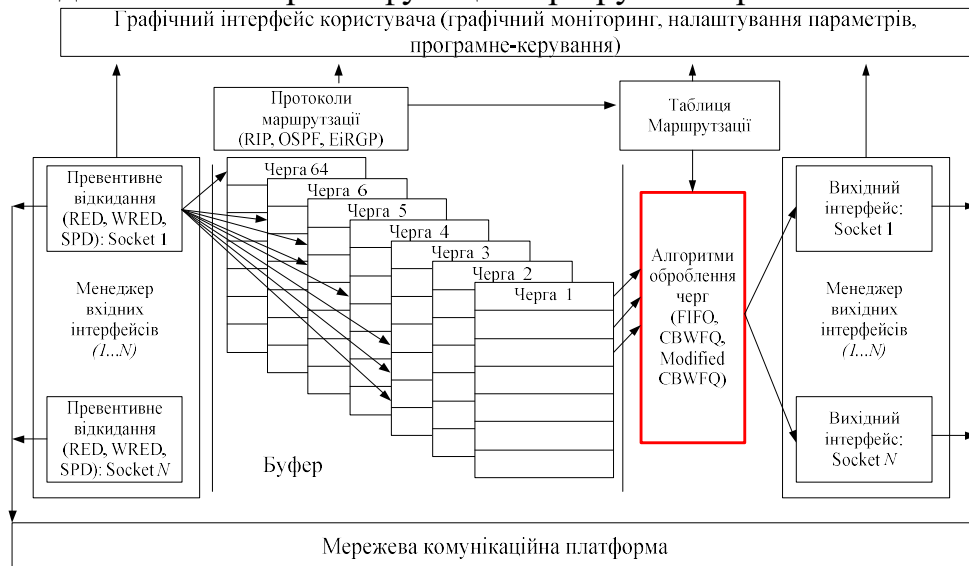


Рис.11. Архітектура віртуального мережного маршрутизатора (VNR)[35]

Для проведення експериментів у роботі створено універсальний генератор трафіку, в основі якого використана розроблена тестова платформа. Генератор дає змогу вибрати профіль трафіку в залежності від експерименту. Для аналізу мережного трафіку використано інструмент під назвою TCPUMP. У результаті

збору даних цією утилітою отримано інформацію про потоки та пакети, що надходили на вибрані порти корпоративної мережі Національного університету «Львівська політехніка». Для перевірки ефективності запропонованого алгоритму M-CBWFQ налаштовано тестову платформу відповідно до схеми на рис. 12 а.

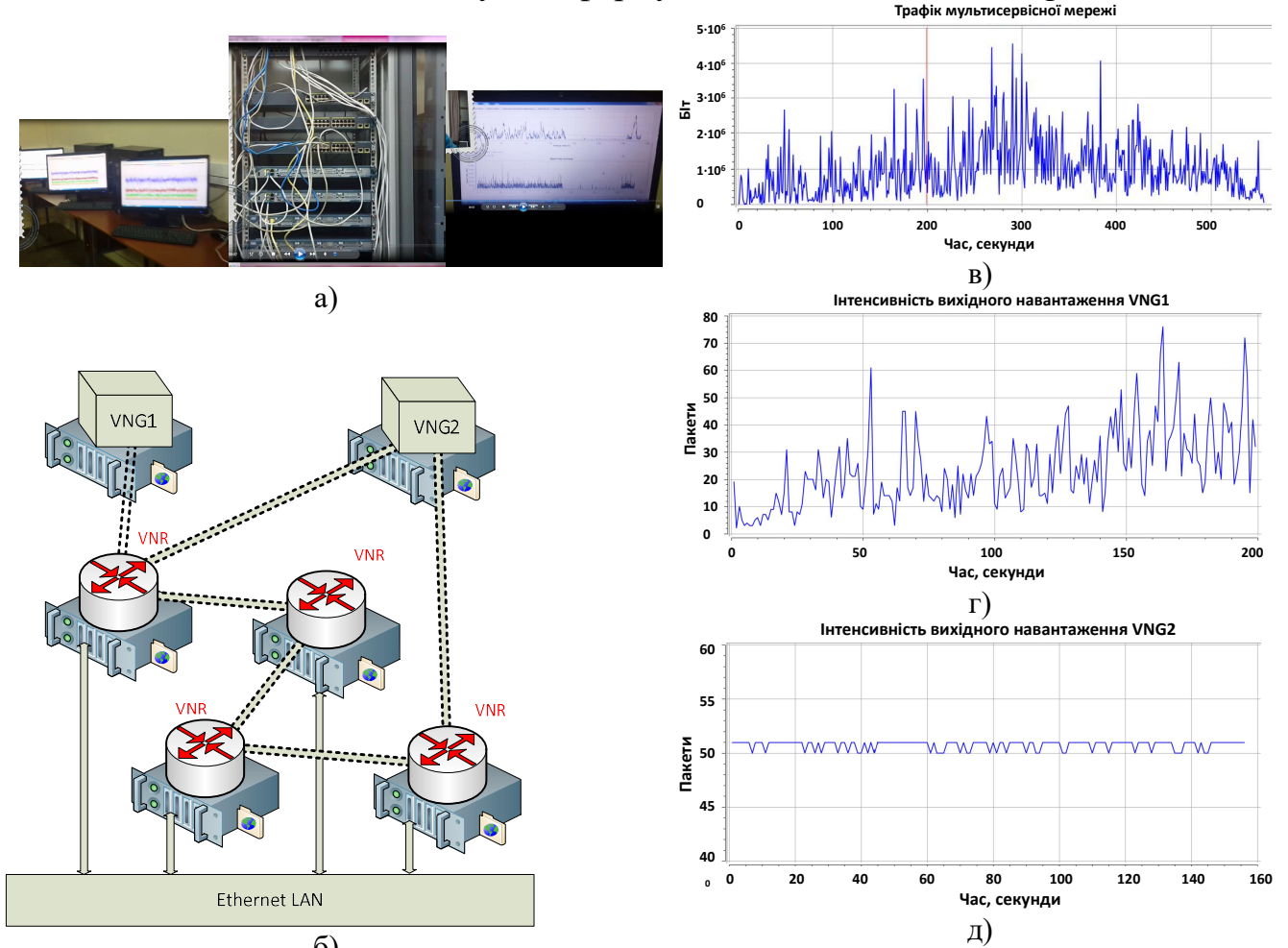


Рис. 12. Програмно-апаратний комплекс мультисервісної функціонально-орієнтованої корпоративної мережі а), схема налаштування тестової платформи для перевірки ефективності запропонованого алгоритму M-CBWFQ б)[48]

Побудована тестова платформа складається з чотирьох маршрутизаторів, які з'єднані між собою, і з двох генераторів трафіку. Кожен маршрутизатор і генератор встановлюється на окрему фізичну машину, параметри якої є такими: модель процесора Intel E2200, обсяг оперативної пам'яті 3 Гб. Всі фізичні машини з'єднані за допомогою однієї локальної мережі, максимальна швидкість каналів якої становить 100 Мбіт/с. Кожен маршрутизатор налаштований таким чином, щоб обробляти в середньому 100 пакетів в секунду зі всіх вхідних інтерфейсів. Це означає, що для обробки одного пакету потрібно близько 10 мілісекунд. Така продуктивність вибрана з метою візуального відображення процесу обслуговування пакетів у реальному часі (див. рис. 12 в-д). Відповідно до цього були налаштовані генератори трафіку. Для оцінювання ефективності алгоритму M-CBWFQ створено маршрут, який проходить через усі встановлені маршрутизатори. Цей маршрут починається з генератора (у вузлі VNG1) і проходить через усі VNR. Останній VNR відправляє усі пакети знову до VNG1. VNG має порт, який дає змогу отримувати пакети. Таким чином, VNG може відмітити пакет і, отримавши його назад,

обчислити загальну затримку (RTT – час обходу петлі) пакету вздовж маршруту. VNG1 призначений для генерування мультисервісного трафіку. Профіль трафіку, отриманий внаслідок моніторингу реальної транспортної мережі представлений на рис.12 в. Обробку пульсацій трафіку згідно M-CBWFQ приймають на себе буфери VNR, що підтверджується також вирівняною інтенсивністю вихідного навантаження від VNG2 (див. рис. 12 д), який додатково приймає трафік від системи VNR. Другий генератор (у вузлі VNG2) налаштовано на генерацію одного потоку IPTV з міжпакетним інтервалом, що дорівнює 20 мс. Розмір кожного пакету в цьому потоці - 1400 байт. Параметри для генерації цього потоку взято на основі усереднення параметрів IPTV потоків, отриманих внаслідок моніторингу локальної мережі за допомогою WireShark. Другий генератор налаштований таким чином, щоб цілеспрямовано вносити випадкову затримку в усі пакети IPTV потоку, що дає змогу наочно оцінити ефект роботи алгоритму M-CBWFQ. Варто зазначити, що кожний віртуальний маршрутизатор дає змогу динамічно включати та виключати алгоритм M-CBWFQ прямо у процесі обслуговування трафіку. Моделювання проводилося протягом 200 секунд.

Інтенсивності потоків з першого та другого генераторів відображено на рис. 12 г та рис. 12 д. На рис.13 а відображено тривалість обходу петлі кожним пакетом, що повернувся на перший генератор, а на рис.13 б – тривалість обходу петлі кожним пакетом згенерованого IPTV потоку на другому генераторі. Експеримент складався з двох етапів. На першому етапі використовувався алгоритм CBWFQ на всіх VNR. Другий етап розпочався через 80 с після першого етапу, при цьому автоматично вмикалося застосування M-CBWFQ алгоритму.

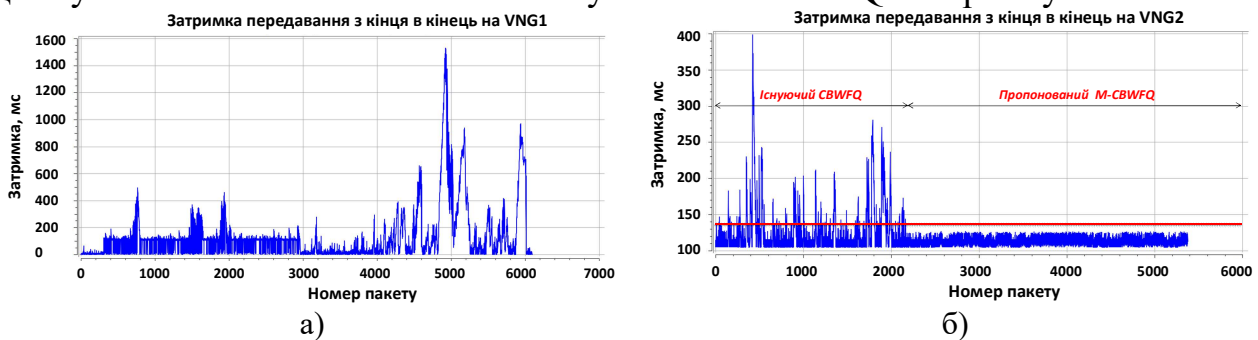


Рис.13. Тривалість обходу петлі пакетами агрегованого потоку на першому генераторі VNG1 а) та пакетами IPTV потоку на другому генераторі VNG2 б) [35]

На першому етапі експерименту середнє значення тривалості обходу петлі для пакетів агрегованого трафіку складається як із затримки пакетів IPTV потоку, так і з затримки пакетів агрегованого потоку. З отриманих графіків тривалості обходу петлі для IPTV потоку можна зробити висновок, що затримка пакетів IPTV в деякі моменти зростала до 150-300 мс, що на 150 мс більше, ніж критична допустима затримка. На другому етапі, коли включено алгоритм M-CBWFQ, середня затримка пакетів IPTV потоку зменшилася у 2 рази, що забезпечило якісне сприйняття відео потоку при втратах до 3%.

Шостий розділ роботи – «Практична реалізація та технічні аспекти впровадження технології віртуалізації мережних пристроїв в корпоративну інфраструктуру» - присвячений практичній реалізації впровадження віртуалізованого маршрутизатора в корпоративну мережу. Для цього у роботі

набула подальшого розвитку **модель програмного маршрутизатора**, який володіє здатністю до самоорганізації віртуальних аналогів апаратних маршрутизаторів різної продуктивності в залежності від функціонально-орієнтованого призначення корпоративних мереж, а також можливістю автоматизованого відновлення працездатності і гарантування заданого рівня якості обслуговування з мінімальними затратами мережних ресурсів в реальному часі [26]. UML-діаграму моделі такого програмного маршрутизатора з віртуалізацією ресурсів представлено на рис. 14 [9].

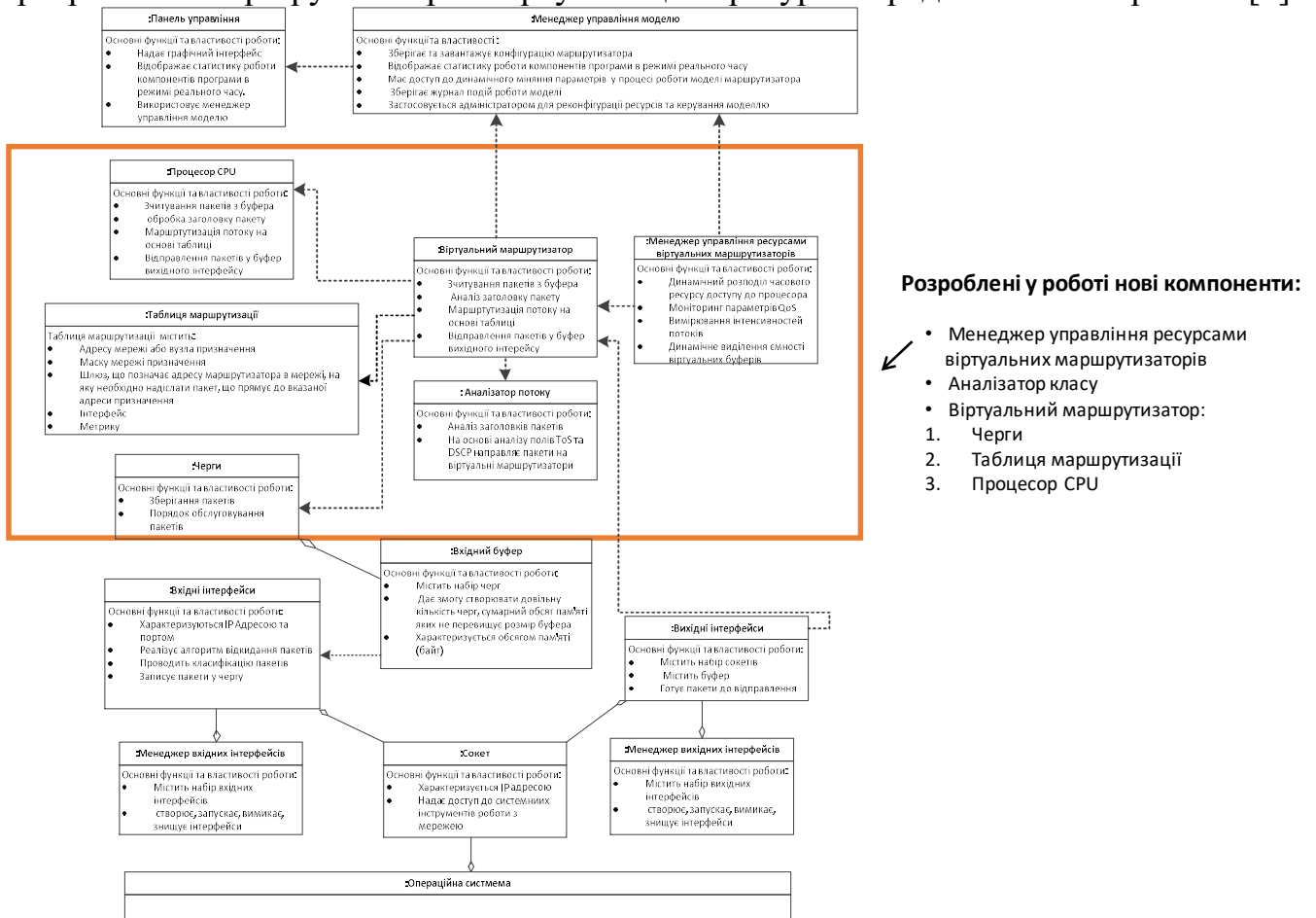


Рис.14. UML-діаграма моделі програмного маршрутизатора з віртуалізацією ресурсів [9]

Для розгортання віртуальних маршрутизаторів в програмній моделі використано компонент менеджера управління ресурсами віртуальних маршрутизаторів. Основні функції якого полягають у динамічному розподілі часового ресурсу доступу до процесора, в залежності від моніторингу поточних параметрів якості обслуговування. Чим більший час використання процесорного ресурсу віртуальним маршрутизатором згідно рис. 14, тим маршрутизатор є продуктивнішим. Наступним кроком є реалізація роботи маршрутизатора з віртуалізацією. Для цього на сервері з операційною системою Linux встановлено програмний маршрутизатор, який працює в стандартному режимі обслуговування пакетів з алгоритмом обробки черг CBWFQ (є можливість встановлення і інших алгоритмів обслуговування черг) та в режимі віртуалізації маршрутизатора.

В результаті розроблення у докторській дисертаційній роботі запропонованих рішень щодо управління ресурсами корпоративної мережі проведено експеримент для оцінювання їх ефективності та впливу на якість сприйняття клієнт-орієнтованої послуги (в даному випадку відеопотік реального часу). Схема складається із двох

програмних маршрутизаторів, клієнта та IPTV сервера [15]. Відповідно, на рис. 16-17 продемонстровано вплив параметрів QoS (втрати, затримки, джитера) на QoE (якість сприйняття) користувачів мережі [20, 22, 25].

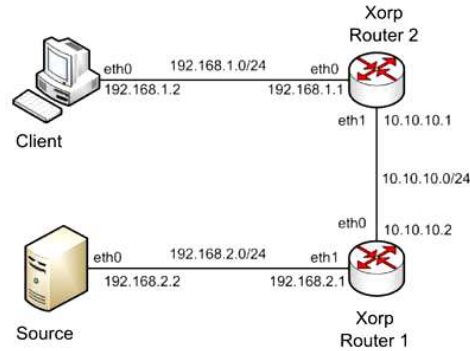


Рис. 15. Мережний тест для багато адресної передачі IP пакетів

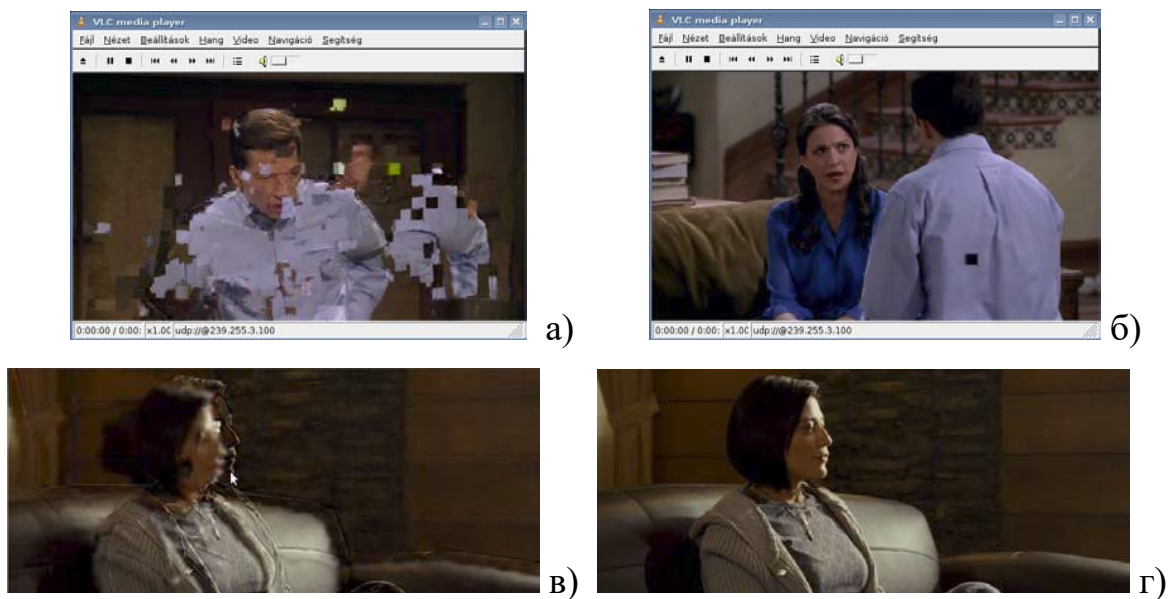


Рис. 16. Зображення при втратах 3% (а), затримка 1 с (в) – існуючі рішення управління ресурсами корпоративної мережі (б) та при втратах 0,1% (г), затримка 100 мс – запропоновані рішення управління ресурсами корпоративної мережі

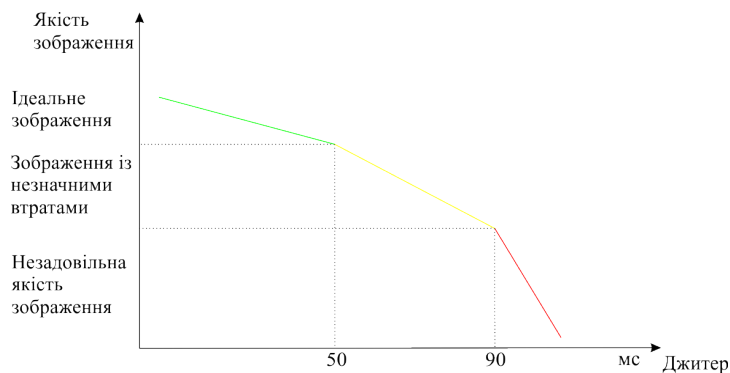


Рис. 17. Вплив джитера на якість зображення

Таким чином, запропонована технологія динамічної віртуалізації мережного пристрою та метод управління чергами дають змогу в процесі динамічного програмного конфігурування мережних ресурсів забезпечити виконання вимог щодо продуктивності мережі, оперативності доставки даних і якості обслуговування корпоративних користувачів.

У **висновках** дисертаційної роботи викладено основні результати і рекомендації, які випливають з проведених досліджень, представлено та охарактеризовано кількісні оцінки показників ефективності при удосконаленні масштабованих телекомунікаційних сервісних платформ корпоративного класу.

У **додатках** до дисертації долучено обрані початкові коди розробленого програмного забезпечення, акти впровадження результатів дисертаційної роботи, а також список наукових праць і апробацій автора за темою дисертації.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі розв'язано наукову проблему забезпечення якості надання інфокомунікаційних послуг шляхом покращення оперативності обміну інформацією в мультисервісних інформаційних функціонально-орієнтованих корпоративних мережах на основі створення методу адаптивного управління структурними параметрами мережевих пристроїв та розвитку математичних моделей і алгоритмів обслуговування черг.

За результатами розв'язання поставленої проблеми можна зробити такі висновки:

1. Проведено аналіз основних вимог, висунутих до функціонально-орієнтованих корпоративних мереж, який показав, що існуючі телекомунікаційні технології, на яких засновані методи управління розподілом трафіку в інформаційно-телекомунікаційних мережах, в умовах зростаючих об'ємів циркулюючої інформації, а також при динамічній зміні структури системи передавання даних не здатні задовільнити вимоги щодо оперативності обміну інформацією. Аналіз основних факторів, які впливають на управління розподілом трафіку, показав необхідність розроблення технології, яка орієнтована на адаптивне управління мережними ресурсами з метою підвищення оперативності передавання інформації в телекомунікаційних мережах корпоративного класу.

2. Формалізовано завдання адаптивного структурно-функціонального синтезу логічної інфраструктури корпоративної мережі, шляхом урахування цільового призначення мережі, флуктуаційного характеру та пікових значень інтенсивностей потокового навантаження різних типів, що при динамічному програмному конфігуруванні ресурсів дало змогу забезпечити виконання вимог до продуктивності мережі, оперативності доставки даних і якості обслуговування абонентів за рахунок більш ефективного функціонування мережі без виділення надлишкових ресурсів. Для визначення ступеня ефективності передавання даних в телекомунікаційній мережі визначено і обґрунтовано вибір відповідних показників і критерію.

3. Розроблено модифікований метод управління чергами в мультисервісних вузлах функціонально-орієнтованої корпоративної мережі. Одна з ключових відмінностей пропонованого рішення полягає в тому, що ведеться контроль за часом перебування в чергах пакетів і, в умовах перевищення допустимого часу очікування, пакет передається на чергу із нижчим пріоритетом та першочерговим обслуговуванням, що дає змогу підвищити ефективність розподілу мережних ресурсів за критерієм якості обслуговування.

4. Розроблено структурно-функціональну модель віртуального маршрутизатора зі статичною та динамічною конфігурацією ресурсів, яка дає змогу створювати віртуальні пристрої з оптимальними параметрами (за критеріями довжини черги, дисципліни керування переповненням черги, кількості обслуговуваних пристроїв, режиму роботи обслуговуваних пристроїв) для забезпечення необхідного рівня QoS в процесі надання послуг. Використання віртуальних мережевих пристроїв в існуючій мережевій інфраструктурі корпоративної мережі дало змогу ефективно розподіляти існуючі мережеві ресурси при великій завантаженості мережі з великою кількістю видів послуг, а також забезпечити необхідну якість сприйняття відповідних послуг кінцевими користувачами, зокрема послуг потокового мультимедіа, як найбільш поширеного та ресурсоємного трафіку.

5. Запропоновано математичну модель мережного пристрою з віртуальними маршрутизаторами. За допомогою такого математичного представлення можна визначити основні параметри системи віртуальних черг, що базуються на алгоритмі FIFO з метою проведення аналізу ефективності використання мережних ресурсів, а також визначення параметрів якості обслуговування потоків трафіку сервісів, що надаються, для заданої інтенсивності надходження пакетів на вхідний інтерфейс мережного елемента. Запропоновано підхід щодо прогнозування тривалості затримки пакетів послуги в i -му віртуальному маршрутизаторі на основі якого можна отримати результати з вищою достовірністю, а також загального часу буферизації пакетів певного сервісу при проходженні через віртуальні вузли із різним коефіцієнтом завантаження на етапі проектування для різних за функціональною орієнтацією корпоративних мереж. Розраховано максимальну допустиму кількість транзитних вузлів, яка може бути задіяна для якісного надання мультисервісних послуг, а саме для голосових даних – відповідна прогнозована кількість вузлів збільшилась до 3.6 разів.

6. Запропоновано метод, який дає змогу з достатнім ступенем точності оцінити присутність в мережному трафіку аномальних властивостей та прийняти необхідні дії щодо блокування несанкціонованої мережної активності шляхом вивчення статистичних залежностей і ентропії трафіку. Разом із застосуванням концепції програмно-керованого віртуального мережного пристрою це підвищує стійкість корпоративних мереж до кібератак.

7. Досліджено вплив конфігурації мережних пристроїв на якість обслуговування засобом Packet tracer та OpNet modeler 14. Аналіз отриманих результатів моделювання показав, що найкращим механізмом надання гарантованої якості обслуговування є Int-DiffServ. Проте, в умовах нестационарності потоків даних в мережі, інтенсивність яких в окремі періоди часу може суттєво перевищувати середньостатистичні значення, існуючі механізми не гарантують забезпечення якості обслуговування. Розроблено імітаційну модель обслуговування послуг в мережних вузлах. Для підтвердження адекватності запропонованої імітаційної моделі проведено аналіз агрегованого трафіку корпоративної мультисервісної мережі. Оцінка параметру Херста підтвердила високу ступінь самоподібності, характерну для мультисервісного трафіку. Це дослідження підтверджує адекватність обраних розподілів та методики формування трафіку на

етапі його імітаційного моделювання для подальшого оцінювання динаміки використання ресурсів мультисервісної мережі нового покоління.

8. Для оцінювання ефективності запропонованих у роботі рішень створено програмно-апаратну платформу функціонально-орієнтованої корпоративної мережі з використанням інструменту QtCreator (версія 5.2). На основі розробленої тестової платформи розроблено модель віртуалізованого програмно-керованого маршрутизатора, який володіє функцією адаптивного вибору алгоритму обслуговування черг в умовах явища випадкових сплесків трафіку характерних для мультисервісних мереж нового покоління. Адекватність розроблених моделей підтверджено на основі дослідження імовірнісних властивостей трафіку мультисервісної корпоративної мережі та порівняння із характеристиками роботи реальних маршрутизаторів. В результаті проведення імітаційного і практичного експериментів доведено, що застосування розроблених моделей та методів надання інфокомунікаційних послуг в мережах нового покоління приводить до покращення якості обслуговування потоків реального часу, а саме (в середньому) до 2 разів знижує затримку обслуговування та зменшує ймовірність втрат пакетів на 3%.

9. Розроблено програмну модель маршрутизатора з набором сучасних механізмів та алгоритмів обслуговування інформаційних потоків. На основі програмної моделі маршрутизатора розширено набір функціональних можливостей такого пристрою, зокрема режимом розгортання віртуальних вузлів з можливістю гнучкого управління структурними параметрами та можливістю автоматизованого відновлення працездатності. Одержано залежність між структурно-функціональними параметрами та параметрами якості обслуговування. Забезпечено узгоджене розв'язання завдань планування та управління обчислювальними ресурсами за рахунок застосування динамічної віртуалізації маршрутизаторів для гарантованого оброблення певних класів трафіку. Динаміка ресурсного управління забезпечується шляхом адаптивного перерозподілу мережного ресурсу при збільшенні або зменшенні обсягів трафіку, що обслуговується. Концепція віртуалізації вузла забезпечує можливість призначення мінімального обсягу обчислювальних ресурсів маршрутизатора для гарантування заданого рівня якості обслуговування та дає змогу на 25-30% знизити показники затримки та джитера (для випадку обслуговування IPTV потоку реального часу).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Колективні монографії:

1. Климаш М.М. Сучасні перетворення в архітектурах розподілених систем: монографія / М.М. Климаш, А.О. Лунтовський, В.І. Романчук. – Львів-Дрогобич: Коло, 2015. – 328 с.

2. Климаш М.М. Завади в транспортних DWDM мережах / М.М. Климаш, В.І. Романчук, Ю.Д. Добуш. – Львів, 2010. – 192 с.

Патенти:

3. Заявка ч 2015 05649 Україна, МПК G06F 5/00. Спосіб поділу результатів моніторингу на дві групи / Климаш М.М., Пелішок В.О., Андрухів Т.В., Романчук В.І. Деклараційний патент на корисну модель, МПК (2016) G06F 5/00. (Україна). U201505649; Заявл. 08.06.2015; Опубл. 25.07.2016. Бюл. № 14, 2016.

4. Заявка у 2015 05662 Україна, МПК Н04В 7/00. Спосіб оптичного передавання з кодовим розділенням каналів / Климаш М.М., Демидов І.В., Романчук В.І. Деклараційний патент на корисну модель, МПК (2009) Н04J 13/02. (Україна). U200907598; Заявл. 20.07.2009; Опубл. 10.11.2009. Бюл. № 21, 2009.

Статті у наукових періодичних виданнях:

5. Demydov I. Traffic Fluctuations Optimization for Telecommunication SDP Segment based on Forecasting using Ateb-functions: / I. Demydov, I. Dronyuk, O. Fedevych, V. Romanchuk // In: N. Kryvinska and M. Greguš, ed. Data-centric business and applications. Evolvments in business information processing and management. Series: Lecture notes on data engineering and communications technologies. Berlin: Springer International Publishing, 2018. – Vol. 20, pp. 71-88. DOI: 10.1007/978-3-319-94117-2_4, ISSN 2367-4512 (Scopus)

6. Maksymyuk T. Designing the New Backhaul for 5G Heterogeneous Network Based on Converged Optical Infrastructure / T. Maksymyuk, O. Krasko, M. Kyryk, V. Romanchuk, R. Kolodiy// Acta Electrotechnica et Informatica, 2017. – Vol. 17, No. 4. – pp. 9–12, DOI: 10.15546/aei-2017-0028. (Index Copernicus)

7. Romanchuk V. Method of multiservice infrastructure decomposition with network resource slicing for IoT / Vasyl Romanchuk, Mykola Beshley, Andriy Prislupskiy, Halyna Beshley, Oleksiy Panchenko// Internet of Things (IoT) and Engineering Applications, Clausius Scientific Press, Canada. – 2018. –Vol. 3. –pp. 22-23. (CrossRef)

8. Romanchuk V. Development of software-based router model with adaptive selection of algorithms for queues servicing / V. Romanchuk, M. Klymash, M. Beshley, O. Panchenko, A. Polishchuk // Technology audit and production reserves. – 2018. - №3/2(41). - pp. 46-55. ISSN 2226-3780. (Index Copernicus, EBSCO)

9. Климаш М.М. Розроблення програмного маршрутизатора з автоматичним розгортанням віртуальних вузлів / М.М. Климаш, В.І. Романчук, О.М. Панченко, М.І. Бешлей, А.В. Поліщук // Радіоелектроніка та телекомунікації [зб. наук. пр.] / відп. ред. Б.А. Мандзій. – Л. : Вид-во Нац. ун-ту «Львів. Політехніка». – 2017. – № 766. –С. 76 – 85. (Index Copernicus, Google scholar)

10. Бешлей М.І. Розвиток методів передавання даних реального часу шляхом вдосконалення процесів пріоритезації потоків у маршрутизаторах / М.І. Бешлей, В.В. Червенець, І.В. Демидов, В.І. Романчук, О.М. Панченко// Системи озброєння і військова техніка: наук. журнал - X: Харк. ун-т Повітр. Сил ім. Івана Кожедуба. - 2016. –№5(142) - С. 114-123. (Index Copernicus, Google scholar)

11. Романчук В. І. Аналіз структури мережевого трафіку та мережевих аномалій на прикладі сегмента локальної мережі кампусу Національного університету “Львівська політехніка”/ В. І. Романчук, С. В. Алексєєв, В. В. Червенець, Р. С. Колодій // Радіоелектроніка та телекомунікації [зб. наук. пр.] / відп. ред. Б.А. Мандзій. – Л. : Вид-во Нац. ун-ту "Львів. політехніка". - 2014. - № 796. - С. 157–163. (Index Copernicus, Google scholar)

12. Стрихалюк Б.М. Дослідження статистичних параметрів та характеристик інформаційних потоків в гетерогенних мережах / Б.М.Стрихалюк, І.В. Демидов, В.І Романчук, М.І. Бешлей // Наукові записки УНДІЗ. – 2014. – №6(34). – С. 82-92.

13. Кільменінов О.А. Моделювання роботи маршрутизатора з віртуалізацією при заданих параметрах якості потокового трафіку / О.А. Кільменінов, В.І. Романчук // Наукові записки УНДІЗ. – 2017. – №4(48). – С. 12-17.
14. Романчук В.І. Аналіз імовірнісних характеристик трафіку інфокомунікаційної корпоративної мережі / В.І. Романчук, О.А. Лаврів, А.В. Поліщук, Р.І. Бак // Зб. наук. пр. УАД. – Львів, 2011. – Вип. 26. - С. 145-151.
15. Климаш М. М. Матричний метод аналізу оптичних транспортних мереж зі спектральним ущільненням каналів / М. М. Климаш, В. І. Романчук // Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка". - 2007. - № 595. - С. 92-98.
16. Андрухів Т. В. Моделювання повністю оптичних мереж зі спектральним ущільненням каналів / Т. В. Андрухів, В. І. Романчук, А. В. Поліщук // Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехніка". - 2008. - № 618. - С. 145-152.
17. Романчук В.І. Покращення якості надання телекомунікаційних послуг в міських транспортних мережах з кодовим розділенням каналів / В.І. Романчук, Т.В. Андрухів, М.М Климаш // Зб. наук. пр. Комп'ютерні технології друкарства. – Львів, 2009. – №22. – С. 76 - 82.
18. Романчук В.І. Дослідження технології IP/MPLS при різних мережевих топологіях / В.І. Романчук, Ю.В. Антонюк, А.В. Поліщук // Радіоелектроніка та телекомунікації [зб. наук. пр.] / відп. ред. Б.А. Мандзій. – Л.: Вид-во Нац. ун-ту "Львів. політехніка". – 2009. – № 645. – С. 95-103.
19. Романчук В.І. Моделювання міських мультисервісних мереж / В.І. Романчук, Ю.В. Мітіхін, Р.С. Колодій, А.В. Поліщук // Радіоелектроніка та телекомунікації [зб. наук. пр.] / відп. ред. Б.А. Мандзій. – Л.: Вид-во Нац. ун-ту "Львів. політехніка". – 2011. – № 705. – С. 152-158.
20. Чернихівський Є.М. Оцінка і управління якістю сприйняття послуги (QoE) в телекомунікаційних мережах / Є.М. Чернихівський, М.І. Кирик, В.І. Романчук, В.В. Червенець // Радіоелектроніка та телекомунікації [зб. наук. пр.] / відп. ред. Б.А. Мандзій. – Л. : Вид-во Нац. ун-ту "Львів. політехніка". – 2010. – № 680. – С. 132–135.
21. Климаш М.М. Дослідження та моделювання роботи Gigabit Ethernet комутатора транспортних оптичних мереж / М.М. Климаш, В.І. Романчук, Б.М. Стрихалюк // Вісник «Радіоелектроніка та телекомунікації». – 2004. - № 508. - С. 152-157.
22. Романчук В.І. Дослідження методів оцінювання якості сприйняття послуг для різних типів трафіку телекомунікаційних мереж / В.І. Романчук, М.М. Климаш, Б.В. Янишин // Радіоелектроніка та телекомунікації [зб. наук. пр.] / відп. ред. Б.А. Мандзій. – Л. : Вид-во Нац. ун-ту "Львів. політехніка", – 2012. - № 738. - С. 165-172.
23. Романчук В.І. Метод узгодженого розв'язання завдань балансування різнопріоритетного навантаження між чергами мережевих пристроїв / В.І. Романчук, М.І. Бешлей, О.М. Панченко, А.В. Поліщук // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. - 2018. - №2(50). - С. 48-57.
24. Бешлей Г.В. Метод декомпозиції структури мережного пристрою з віртуалізацією ресурсів / В. І. Романчук, М. І. Бешлей, А. М. Прислупський,

Г.В. Бешлей // Наукові записки [Української академії друкарства]. – 2018. - №1(56). – С. 31-42.

Публікації у матеріалах конференцій, які індексуються в міжнародних науково-метричних баз даних:

25. Chervenets V. QoS/QoE Correlation Modified Model for QoE Evaluation on Video Service / V. Chervenets, V. Romanchuk, H. Beshley, A.Khudyu // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science Proceedings of the XIII th International Conference TCSET'2016 (Lviv – Slavske) 2016.– P. 664-666. (Scopus)

26. Romanchuk V. Research of Multimedia Streaming Transmission in Multiservice Networks / V. Romanchuk, V. Chervenets, A. Polishuk // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science Proceedings of the XI th International Conference TCSET'2012 (Lviv – Slavske, February 21–24), 2012. - P. 39. (Scopus)

27. Romanchuk V. Development the Methods of Conversion to Photonic Transport Networks / V. Romanchuk, O. Krasko, O. Koretsky // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science Proceedings of the XI th International Conference TCSET'2012 (Lviv – Slavske, February 21–24), 2012. - P. 258. (Scopus)

28. Romanchuk V. The Main Causes of Failures SQL Server / V. Romanchuk, T. Andrukhiv, I. Kahalo // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science Proceedings of the XI th International Conference TCSET'2012 (Lviv – Slavske, February 21–24), 2012. - P. 258. (Scopus)

29. Beshley M. Ensuring the quality of service flows in multiservice infrastructure based on network node virtualization / M. Beshley, V. Romanchuk, V. Chervenets and A. Masiuk // 2016 International Conference Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo), Kiev, 2016, pp. 1-3. (Scopus)

30. V. Romanchuk. Design of software router with a modular structure and automatic deployment at virtual nodes / V. Romanchuk, M. Beshley, O. Panchenko and A. Polishchuk / 2017 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT), Lviv, 2017, pp. 295-298. (Scopus)

31. Chervenets V. Quality increasing of traffic flow transferring in multiservice networks / V. Chervenets, V. Romanchuk, O. Puha and O. Bilyk / 2017 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT), Lviv, 2017, pp. 274-277. (Scopus)

32. Chervenets V. Investigation and Simulation of System for Data Flow Processing in Multiservice Nodes Using Virtualization Mechanisms / M. Klymash, V. Romanchuk, M. Beshley and A. Polishchuk // 2017 IEEE First Ukraine Conference on electrical and computer engineering (UKRCON). - pp. 989-992. (Scopus)

33. Romanchuk V. Telemedicine system model using Internet-technology / V. Romanchuk, T M. Klymash, V. Krasko // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science Proceedings of the XI th International Conference TCSET'2010 (Lviv – Slavske, February 23–27), 2010. - P. 259. (Scopus)

34. Polishchuk A. Research Methods to Provide Services in NGN / A. Polishchuk, E. Chernykhivsky, V. Chervenets, V. Romanchuk// Modern problems of radio

engineering, telecommunications and computer science Proceedings of the X th International Conference TCSET'2010. Lviv – 2010, P. 238. (Scopus)

35. Beshley M. Investigation the modified priority queuing method based on virtualized network testbed / M. Beshley, V. Romanchuk, M. Seliuchenko, A. Masiuk // Proceedings of XIIIth international conference "The experience of designing and application of CAD Systems in microelectronics" CADSM'2015 (24-27 February, Lviv-Poljana, Ukraine), 2015. - P. 1-4. (Scopus)

36. Romanchuk V. Method for processing multiservice traffic in network node based on adaptive management of buffer resource / V. Romanchuk M. Beshley, A. Polishuk and M. Seliuchenko // 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET 2018), Lviv-Slavske, 2018, pp. 1118-1122. (Scopus)

Публікації у матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій:

37. Романчук В.І. Аналіз методів оцінювання та контролю у Віртуальному навчальному середовищі Львівської політехніки / В.І. Романчук // Інноваційні комп'ютерні технології у вищій школі : матеріали науково-практичної конференції, 18–19 лютого 2010 року, Львів / Національний університет "Львівська політехніка". – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2010. – С. 36–40.

38. Червенець В. В. Модель віртуального маршрутизатора з статичною та динамічною реконфігурацією ресурсів / М. І. Бешлей, В. В. Червенець, В. І. Романчук, А. В. Поліщук // X Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» ПТ-2016: збірник матеріалів конференції (19-22 квітня 2016р., м. Київ, Україна), 2016 - К.: НТТУ «КПІ». – С. 140-142.

39. Романчук В. Дослідження імовірнісних властивостей трафіку корпоративної мультисервісної мережі / В. Романчук, В. Червенець // Комп'ютерні науки та інженерія, матеріали V Міжнародної конференції молодих вчених CSE-2011 – Львів. – 2011. – С. 220–221.

40. Романчук В. Реалізація QoS для мультимедійного трафіку в корпоративній мережі / В.І. Романчук, В.В. Червенець. // Матеріали НМК “Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2011”. – Львів – 2011. – С. 17 – 20.

41. В.І. Романчук. Дослідження динамічних методів маршрутизації на транспортній мережі / В.І. Романчук // Матеріали конференції “Інноваційні комп'ютерні технології у вищій школі”. – Львів, 2010. – С. 30-33.

42. В.І. Романчук. Перехід до фотонних мереж / В.І. Романчук, О.В. Красько // Наукова практична конференція “Сучасні проблеми телекомунікації -2011”. – Львів 2011. – С. 17-21.

43. В.І. Романчук. Аналіз методів передачі трафіку реального часу в телекомунікаційних мережах / В.І. Романчук, О.А. Лаврів, А. В. Поліщук // Міжнародна конференція “Телекомунікаційні системи і технології” (МКТСТ'2011), 18-21 жовтня 2011р. - Харків, Україна. - С. 121 – 124.

44. В.І. Романчук. Дослідження передавання інформаційного навантаження потокового мультимедіа / В.І. Романчук, В.В. Червенець, А.В. Поліщук // Наукова-методична конференція “Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій -2012”.– Львів, 2012. – С. 71-72.

45. В.І. Романчук. Моделювання перехресних завод в DWDM системах / В.І. Романчук, О.В. Корецький // Наукова-методична конференція “Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій -2012”. – Львів, 2012. – С. 68-70.

46. Beshley M. Method of Resource Distribution for Mobile Cloud Computing Systems. / M. Beshley, B. Buhyl, V. Romanchuk, M. Klymash // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science Proceedings of the XII th International Conference TCSET'2014 (Lviv – Slavske), 2014. - P. 581-584.

47. В.І. Романчук. Програмовані SDN мережі. Сучасні виклики та інтеграція нових концепцій: Internet of Everything, SDN, ACI / В.І. Романчук, С.В. Алексеев // Наукова практична конференція “Сучасні проблеми телекомунікації -2014”, 30 жовтня – 2 листопада, – Львів 2014. – С. 51-57.

48. М.М. Климаш. Розроблення макету мультисервісної мережі на базі програмно – апаратної платформи для забезпечення навчально – наукового процесу кафедри телекомунікацій / М.М. Климаш., В.І. Романчук., М.І. Бешлей // 1st International Conference "Advanced Information and Communication Technologies"(АІСТ'2015). Conference proceedings. (29 October – 01 November, Lviv, Ukraine), 2015.– P. 175-178.

49. Лунтовський А.О. Дослідження ефективності використання ресурсів навчально-наукового центру паралельних обчислень / М.М. Климаш., В.І. Романчук, М.І. Бешлей, А.О. Лунтовський // Міжнародна науково-технічна конференція (Сучасні інформаційно-телекомунікаційні технології) Матеріали науково-технічної конференції 17–20 листопада 2015 м. Київ. - С.61-63.

АНОТАЦІЯ

Романчук В.І. Методи та алгоритми управління ресурсами мультисервісних інформаційних функціонально-орієнтованих корпоративних мереж. – 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, м.Львів, 2018.

Дисертаційну роботу присвячено розв’язанню актуальної наукової проблеми забезпечення якості надання інфокомунікаційних послуг шляхом покращення оперативності обміну інформацією в мультисервісних інформаційних функціонально-орієнтованих корпоративних мережах на основі створення методу адаптивного управління структурними параметрами мережних пристроїв та розвитку математичних моделей і алгоритмів обслуговування черг.

Сформульовано завдання адаптивного структурно-функціонального синтезу логічної інфраструктури корпоративної мережі. Розроблено модифікований метод управління чергами в мультисервісних вузлах мережі, використання якого дає змогу підвищити ефективність розподілу мережних ресурсів за критерієм якості обслуговування з кінця в кінець шляхом динамічної адаптації буферних та каналних ресурсів. Запропоновано структурно-функціональну модель мережного пристрою з віртуалізацією ресурсів, що дала змогу розгортати на одній фізичній машині декілька аналогів апаратних маршрутизаторів призначених для

обслуговування однотипного трафіку. Запропоновано ентропійний метод виявлення аномалій мережного трафіку для підвищення стійкості корпоративної мережної системи до кібератак. Представлено математичну модель процесу функціонування віртуалізованого маршрутизатора, яка дає змогу визначити показники ефективності мережі та оцінити масштабованість корпоративної інфраструктури згідно угоди про рівень надання послуги. Розроблено тестову платформу віртуальної мережі нового покоління із програмно-керованими маршрутизаторами, які володіють функцією адаптивного вибору алгоритму обслуговування черг в умовах виникаючого явища випадкових сплесків трафіку, характерних для мультисервісних мереж нового покоління. Адекватність розроблених моделей підтверджено на основі дослідження імовірнісних властивостей трафіку мультисервісної корпоративної мережі та порівнянням тривалостей його обслуговування із реальним апаратним маршрутизатором. В результаті проведення імітаційного і практичного експериментів доведено, що застосування розроблених моделей та методів управління ресурсами корпоративної мережі приводить до покращення якості обслуговування потоків реального часу (в середньому до 2 разів знижено затримку обслуговування та зменшено ймовірність втрат пакетів на 3%). Проведено дослідження якості обслуговування потокового трафіку на основі розробленої моделі програмного маршрутизатора з можливістю розгортання віртуальних обслуговуючих пристроїв класового призначення. Шляхом проведення експерименту в мультисервісній мережі встановлено, що застосування розроблених моделей і методу динамічної віртуалізації мережного пристрою забезпечує можливість призначення мінімально необхідного обсягу мережеских ресурсів для гарантування заданого рівня якості обслуговування та дає можливість на 25-30% підвищити якість обслуговування потокового відео трафіку реального часу за критеріями затримки та джитеру. Оцінено вигоду за якістю сприйняття послуги відеоконтенту реального часу після застосування запропонованих рішень управління мережескими ресурсами шляхом виконання натурного експерименту.

Ключові слова: мультисервісна мережа, якість обслуговування, розподіл ресурсів, буфер, віртуалізація, маршрутизатор, самоподібність, функціонально-орієнтована корпоративна мережа.

АННОТАЦИЯ

Романчук В.И. Методы и алгоритмы управления ресурсами мультисервисных информационных функционально-ориентированных корпоративных сетей. – 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, г. Львов, 2018.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научной проблемы обеспечения качества предоставления инфокоммуникационных услуг путем улучшения оперативности обмена информацией в мультисервисных информационных функционально-ориентированных корпоративных сетях на основе создания метода адаптивного управления структурными параметрами сетевых устройств и развития математических моделей и алгоритмов обслуживания очередей.

Сформулированы задачи адаптивного структурно-функционального синтеза логической инфраструктуры корпоративной сети. Разработан модифицированный метод управления очередями в мультисервисных узлах сети, использование которого позволяет повысить эффективность распределения сетевых ресурсов по критерию качества обслуживания из конца в конец путем динамической адаптации буферных и канальных ресурсов. Предложена структурно-функциональную модель сетевого устройства с виртуализацией ресурсов, которая позволила разворачивать на одной физической машине несколько аналогов аппаратных маршрутизаторов, предназначенных для обслуживания однотипного трафика. Предложен энтропийный метод выявления аномалий сетевого трафика для повышения стойкости корпоративной сетевой системы к кибератакам. Представлена математическая модель процесса функционирования виртуализированного маршрутизатора, которая позволяет определить показатели эффективности сети и оценить масштабируемость корпоративной инфраструктуры по договору об уровне предоставления услуги. Разработана тестовая платформа виртуальной сети нового поколения с программно-управляемыми маршрутизаторами, которые обладают функцией адаптивного выбора алгоритма обслуживания очередей в условиях возникающего явления случайных всплесков трафика, характерных для мультисервисных сетей нового поколения. Адекватность разработанных моделей подтверждена на основе исследования вероятностных свойств трафика мультисервисной корпоративной сети и сравнением длительностей его обслуживания с реальным аппаратным маршрутизатором. В результате проведения имитационного и практического экспериментов доказано, что применение разработанных моделей и методов управления ресурсами корпоративной сети приводит к улучшению качества обслуживания потоков реального времени (в среднем до 2 раз снижена задержка обслуживания и уменьшена вероятность потерь пакетов на 3%). Проведено исследование качества обслуживания потокового трафика на основе разработанной модели программного маршрутизатора с возможностью развертывания виртуальных обслуживающих устройств классового назначения. Путем проведения эксперимента в мультисервисной сети установлено, что применение разработанных моделей и метода динамической виртуализации сетевого устройства обеспечивает возможность назначения минимально необходимого объема сетевых ресурсов для обеспечения заданного уровня качества обслуживания и позволяет на 25-30% повысить качество обслуживания потокового видео трафика реального времени по критериям задержки и джиттера. Оценен выигрыш по качеству восприятия услуги видеоконтента реального времени после применения предложенных решений управления сетевыми ресурсами путем выполнения натурального эксперимента.

Ключевые слова: мультисервисная сеть, качество обслуживания, распределение ресурсов, буфер, виртуализация, маршрутизатор, самоподобие, функционально-ориентированная корпоративная сеть.

ABSTRACT

Romanchuk V. I. Resource management methods and algorithms for multiservice information function-oriented corporate networks.

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 dissertation is devoted to solving the actual scientific problem of ensuring the quality of provisioning of info-communication services by improving the efficiency of information exchange in multiservice information functional-oriented corporate networks on the basis of the creation of a method for adaptive control of structural parameters of network devices and the development of mathematical models and algorithms of servicing queues.

The problem of adaptive structural and functional synthesis of the logical infrastructure of the corporate network has been formulated. The modified method for managing queues in multiservice nodes of the network is contributed. This method allows to increase the efficiency of network resource distribution based on the end to end quality of service through dynamic adaptation of buffer and channel resources. The structural and functional model of network device with resource virtualization has been proposed. This model allows to deploy several software analogs of hardware routers on the same physical machine for servicing different types of traffic. The entropy method of detection of network traffic anomalies has been proposed for increasing the stability of the corporate network system against cyber-attacks. The mathematical model of the functioning of the virtualized router has been presented. The model allows to determine the performance of the network and assess the scalability of the corporate infrastructure in accordance with the agreement on the level of service provisioning. A new generation virtual network test platform with software-driven routers has been deployed to enable the adaptive selection of queuing algorithms in the context of the emerging phenomenon of random traffic bursts, which are typical for multiservice networks of the new generation. The adequacy of the developed models has been confirmed through the investigation of probabilistic properties of traffic in multiservice corporate networks and comparison of the processing delay with the real hardware router. As a result of simulation and practical experiments, it has been proved that application of developed models and methods of corporate network resource management leads to improvement of the quality of service of real-time streams (on average, service delays have been reduced to 2 times and the probability of loss of packages by 3%). The study of the quality of service for streaming traffic has been conducted on the basis of the developed model of the software router through deploying virtual devices per traffic class. By conducting an experiment in a multiservice network, it has been proved that application of the developed models and the method of dynamic virtualization of the network device provide the possibility of assigning the minimum required volume of network resources to guarantee a given level of quality of service and gives the opportunity to increase the quality of streaming video traffic by 25-30% according to the criteria of delay and jitter. The gain on the quality of experience of the real time video content after the application of the proposed solutions for managing network resources by performing a full-scale experiment has been confirmed through experiments.

Key words: multiservice network, service quality, resource allocation, buffer, virtualization, router, self-similarity, function-oriented corporate network.