

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

ЛЕБЕДЕНКО Тетяна Миколаївна

УДК 621.391

**МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ АКТИВНОГО УПРАВЛІННЯ ЧЕРГАМИ  
ТА ПРОПУСКНОЮ ЗДАТНІСТЮ ІНТЕРФЕЙСІВ  
ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ**

05.12.02 – Телекомунікаційні системи та мережі

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2019

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Харківському національному університеті радіоелектроніки  
Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор

**ЛЕМЕШКО Олександр Віталійович,**

Харківський національний університет радіоелектроніки,

завідувач кафедри інфокомунікаційної інженерії ім. В.В. Поповського

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор

**МОЖАЄВ Олександр Олександрович,**

Харківський національний університет внутрішніх справ,

професор кафедри інформаційних технологій та кібербезпеки

кандидат технічних наук

**СОЛОВСЬКА Ірина Миколаївна,**

Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,

старший викладач кафедри комутаційних систем

Захист відбудеться 26 грудня 2019 року, о 13 годині, на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.09 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: Україна, 61166, м. Харків, пр. Науки, 14.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: Україна, 61166, м. Харків, пр. Науки, 14.

Автореферат розісланий 23 листопада 2019 року

Учений секретар

спеціалізованої вченої ради

М.О. Євдокименко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Стрімкий розвиток та постійне вдосконалення інфокомунікаційних технологій (ІКТ) є однією з відмінних рис сучасного суспільства. При цьому підтримка мультисервісності та всебічно зростаюча необхідність в передачі великих об'ємів різнорідного контенту визначає гостру потребу забезпечення користувачам телекомунікаційних мереж (ТКМ) заданого рівня якості обслуговування (Quality of Service, QoS). Слід відмітити, що провідну роль серед засобів, направлених на підвищення рівня якості обслуговування в ТКМ, традиційно займають механізми управління чергами, профілювання трафіку, резервування ресурсів та маршрутизації, значний внесок в розробку, розвиток та обґрунтування яких зробили такі іноземні фахівці, як Gallager R., Tipper D., Wang W.P., Stallings W., Berreiros M., Rao D.S., Tan L., та вітчизняні вчені Поповський В.В., Беркман Л.Н., Романюк В.А., Стрелковська І.В., Ложковський А.Г., Лемешко О.В., Климаш М.М. та інші.

Проведений аналіз свідчить про те, що на інтерфейсах маршрутизаторів телекомунікаційних мереж досить розрізнено використовується множина технологічних засобів управління чергами:

- механізми управління перевантаженнями, які відповідають за формування черг на інтерфейсах маршрутизаторів, за розподіл пакетів між ними та за планування порядку обслуговування пакетів в цих чергах;
- механізми розподілу ресурсів, які реалізують розподіл пропускнуої здатності інтерфейсу між сформованими на ньому чергами;
- механізми активного управління чергами (механізми запобігання перевантаження), які відповідають за запобігання можливого їх переповнення на підставі превентивного відкидання пакетів.

Аналіз відомих технологічних та теоретичних рішень в даній області виявив ряд вимог, які висуваються до математичних моделей та методів управління чергами та пропускнуою здатністю інтерфейсів ТКМ:

- забезпечення диференціації в обслуговуванні пакетів різних класів;
- здатність моделей та методів адаптувати свої параметри в залежності від зміни характеристик трафіка та стану інтерфейсу;
- підтримка динамічної стратегії управління чергами, що полягає у здатності моделей та методів забезпечувати пошук ефективних рішень в масштабі реального часу;
- забезпечення погодженого розв'язання задач управління перевантаженнями, розподілу ресурсів та активного управління чергами;
- прийнятна обчислювальна складність алгоритмічно-програмної та апаратної реалізації зазначених моделей та методів на практиці.

На сьогодні реалізація наведених вимог в рамках єдиного технологічного рішення щодо управління чергами досі теоретично не забезпечена та не введена на практиці. Крім того, існуючі механізми переважно базуються на статичних адміністративних налаштуваннях та не враховують можливої нестационарності стану мережних інтерфейсів, а перспективні теоретичні рішення нерідко

супроводжуються високою обчислювальною складністю розрахунків. Тому набуває актуальності **науково-прикладна задача**, пов'язана з оптимізацією процесів активного управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів телекомунікаційних мереж за рахунок забезпечення комплексного вирішення задач управління та запобігання перевантаженням, а також розподілу каналного ресурсу в умовах високої динаміки зміни стану мережних інтерфейсів, шляхом розробки нових та вдосконаленні вже існуючих математичних моделей та методів, орієнтованих на підвищення рівня якості обслуговування в ТКМ в цілому.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано згідно з вимогами основних положень «Концепції національної інформаційної політики», «Концепції Національної програми інформатизації», «Концепції розвитку телекомунікацій в Україні», «Концепції конвергенції телефонних мереж і мереж з пакетною комутацією в Україні», рекомендацій стосовно «Реформ в галузі інформаційно-комунікаційних технологій та розвитку інформаційного простору України», планами наукової та науково-технічної діяльності Харківського національного університету радіоелектроніки. Результати дисертації використані в ході виконання НДР «Підвищення масштабованості технологічних рішень щодо забезпечення якості обслуговування в конвергентних телекомунікаційних системах» (ДР: 0115U002432), в якій здобувач виступав виконавцем. Отримано патент на корисну модель [15].

**Мета дисертаційної роботи** полягає в підвищенні рівня якості обслуговування потоків користувачів шляхом розробки та вдосконалення математичних моделей та методів активного управління чергами та пропускнуою здатністю інтерфейсів телекомунікаційних мереж.

У дисертаційній роботі для вирішення поставленої наукової задачі сформульовані та розв'язані такі окремі **задачі дослідження**:

- аналіз сучасного стану та тенденцій розвитку рішень щодо управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів телекомунікаційних мереж;
- розробка та дослідження моделі та методу збалансованого управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів телекомунікаційних мереж;
- розробка та дослідження моделі та методу активного управління чергами та пропускнуою здатністю інтерфейсів маршрутизаторів ТКМ;
- розробка та дослідження динамічної моделі управління чергами та пропускнуою здатністю інтерфейсів маршрутизаторів телекомунікаційних мереж;
- експериментальна оцінка ефективності запропонованих в дисертації рішень щодо активного управління чергами та пропускнуою здатністю інтерфейсів.

**Об'єкт дослідження:** процеси управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів телекомунікаційних мереж.

**Предмет дослідження:** моделі та методи активного управління чергами та пропускнуою здатністю інтерфейсів маршрутизаторів телекомунікаційних мереж.

**Методи дослідження:** у дисертаційній роботі знайшли застосування методи аналітичного та імітаційного моделювання. У ході розробки та вдосконалення моделей та методів збалансованого та активного управління чергами та пропускнуою здатністю інтерфейсів маршрутизаторів телекомунікаційних мереж були використані оптимізаційні методи математичного програмування. При розробці

та дослідженні динамічної моделі управління чергами в умовах нестационарного режиму роботи інтерфейсу ТКМ було застосовано функціонал теорії масового обслуговування та теорії диференціальних рівнянь стану мережі, заснованих на стаціонарній поточковій апроксимації нестационарного потоку (The Pointwise Stationary Fluid Flow Approximation, PSFFA). Для підтвердження ефективності отриманих мережних рішень використовувався функціонал пакетів MATLAB Optimization Toolbox та Simulink, а також методи лабораторного експерименту.

### **Наукові результати, отримані дисертантом, та їхня новизна.**

1. Вдосконалено метод збалансованого управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів телекомунікаційних мереж. Новизна рішень полягає, по-перше, в забезпеченні узгодженого, заснованого на послідовному розв'язанні оптимізаційних задач агрегування потоків пакетів за чергами та розподілу між ними пропускної здатності інтерфейсу, що дозволило значно скоротити розмір задачі управління чергами та знизити обчислювальну складність кінцевих рішень без зниження рівня їхньої ефективності; по-друге, в збалансованому розподілі пропускної здатності інтерфейсу маршрутизатора між чергами пакетів відповідно до значень класів черг та потоків, що дозволило забезпечити підвищення якості диференційованого обслуговування пакетів.

2. Уперше запропоновано метод активного управління чергами та пропускною здатністю інтерфейсів маршрутизаторів телекомунікаційних мереж. Новизна методу полягає в погодженому розв'язанні оптимізаційних задач щодо розподілу пропускної здатності інтерфейсу між сформованими чергами та заснованого на пріоритетах обмеження інтенсивності потоків пакетів, що надходять на інтерфейс маршрутизатора. Застосування методу дозволяє в залежності від виду використаного критерію оптимальності отримуваних рішень реалізувати політику диференційованих відмов в обслуговуванні пакетів на основі як абсолютних, так і відносних пріоритетів.

3. Удосконалено динамічну модель управління чергами та пропускною здатністю інтерфейсів маршрутизаторів телекомунікаційних мереж. Новизна моделі полягає в тому, що під час розподілу пропускної здатності інтерфейсу маршрутизатора враховується динаміка зміни його стану в часі, яка описувалась нелінійними диференціальними рівняннями, заснованими на стаціонарній поточковій апроксимації нестационарного потоку (PSFFA). Це дозволило більш адекватно розрахувати середню довжину кожної з черг в заданий момент часу, що сприяло ефективнішому розподілу між ними пропускної здатності інтерфейсу та підвищенню рівня якості обслуговування в мережі в цілому.

**Обґрунтованість і достовірність наукових результатів, висновків і рекомендацій, які захищаються, підтверджувалися коректним використанням положень добре апробованого математичного апарату, представленого теорією масового обслуговування, теорії диференціальних рівнянь, методами математичного програмування, а також належним аналітичним та числовим обґрунтуванням прийнятих наближень, наочністю та фізичною інтерпретацією отриманих результатів дослідження. Адекватність рішень підтверджувалася допустимим збігом результатів аналітичних розрахунків, імітаційного моделювання та проведеного лабораторного експерименту.**

**Практична значимість дисертаційної роботи.** Практична цінність отриманих в дисертаційній роботі результатів полягає в можливості їхнього використання при вирішенні прикладних задач управління перевантаженням, розподілу ресурсів та активного управління чергами в умовах нестационарного режиму роботи інтерфейсів маршрутизаторів телекомунікаційних мереж. Алгоритмічна реалізація на практиці пропонованих моделей та методів може бути покладена в основу перспективних механізмів управління чергами з метою підвищення рівня QoS в ТКМ в цілому.

Результати дисертаційної роботи використані в ході науково-дослідної роботи: № 299-1 «Підвищення масштабованості технологічних рішень щодо забезпечення якості обслуговування в конвергентних телекомунікаційних системах», у якій здобувач виступав виконавцем. Крім того, практична значимість отриманих результатів підтверджується їх застосуванням у навчальному процесі кафедри інфокомунікаційної інженерії імені В.В. Поповського ХНУРЕ в дисципліні «Системи комутації та розподілу інформації, частина 2». Отримано патент на корисну модель [15].

**Особистий внесок здобувача.** Усі основні наукові результати, висвітлені в дисертаційній роботі, здобувач отримав самостійно. Крім того, в роботі [1] здобувачем проведено аналіз впливу зміни стану інтерфейсу маршрутизатора на динаміку завантаженості черг телекомунікаційних мереж; в статті [2] здобувачем проведено дослідження щодо динаміки зміни середньої довжини черги та міжкінецьових показників якості обслуговування на інтерфейсах маршрутизаторів ТКМ в залежності від характеристик потоків та черг, а також моделюванні роботи інтерфейсу маршрутизатора різними системами масового обслуговування при використанні імітаційної моделі, побудованої в пакеті MATLAB Simulink; в роботі [3] здобувачем розроблено лінійну модель оптимального управління чергами на інтерфейсі маршрутизатора ТКМ; в роботі [4] здобувачем запропоновано вдосконалення моделі управління чергами, заснованої на оптимальній агрегації потоків та розподілі пропускної здатності інтерфейсу; в роботі [5] здобувачем розроблено динамічну модель управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів ТКМ; в роботі [6] здобувачем розроблено метод збалансованого управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів ТКМ, що відповідає принципам концепції Traffic Engineering; в роботі [8] здобувачем розроблено та досліджено метод активного управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів ТКМ.

**Апробація.** Основні результати дисертації доповідалися на 23 Міжнародних конференціях та форумах, в тому числі на I, V Міжнародних конференціях «Інфокомунікації – сучасність та майбутнє» (Одеса, ОНАЗ, 2011, 2015); на XII Всеукраїнській науково-технічній конференції «Стан, досягнення і перспективи інформаційних систем і технологій» (Одеса, ОДАХ, 2012); на XVI, XVII, XIX Міжнародних форумах «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті» (Харків, ХНУРЕ, 2012, 2013, 2015); на VIII Міжнародній конференції «Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій (РТ-2012)» (Севастополь, СевНТУ, 2012); на науково-технічній конференції «Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM» (Київ, НАУ, 2014); на 69-й на-

уково-технічній конференції професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів (Одеса, ОНАЗ, 2014); на I Міжнародній конференції «Проблеми електромагнітної сумісності перспективних безпроводових мереж зв'язку» (Харків, 2015); на II, V Міжнародних IEEE-конференціях «Problems of Infocommunications, Science and Technology (PICS&T)» (Kharkiv, 2015, 2018); на I, III Міжнародних IEEE-конференціях «Advanced Information and Communication Technologies (AICT)» (Lviv, 2015, 2019); на XIII, XIV Міжнародних IEEE-конференціях «Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science (TCSET)» (Lviv-Slavske, 2016, 2018); на науковій конференції «Інформатика, математика, автоматика (ІМА-2018)» (Суми, СумДУ, 2018); на X Міжнародній конференції «Перспективи розвитку інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем (ПРІТС-2018)» (Київ, НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2018); на III Міжнародній конференції «Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)» (Odesa, 2018); на VII Міжнародній конференції «Фізико-технологічні проблеми передавання, оброблення та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах (PREDT'2018)» (Чернівці, ЧНУ, 2018); на XV Міжнародній IEEE-конференції «The Experience of Designing and Application of CAD System in Microelectronic (CADSM'2019)» (Polyana-Svalyava, 2019); на III Міжнародній конференції «Комп'ютерні та інформаційні системи і технології (CSITIC'2019)» (Харків, ХНУРЕ, 2019).

**Публікації.** Основні положення та результати дисертаційної роботи опубліковано у 31 науковій праці, у тому числі 8 статтях, серед яких 6 статей у наукових фахових виданнях України та таких, що включені до міжнародних наукометричних баз [1, 2, 5-8], 1 стаття у закордонному журналі [3], 1 стаття індексується наукометричною базою Scopus [4], 1 стаття виконана без співавторства [7]. Отримані результати та висновки апробовано на 23 Міжнародних наукових конференціях та форумах, з яких 6 на конференціях, що проходили під егідою IEEE та індексуються наукометричною базою Scopus [9-14]. Отримано один патент на корисну модель [15].

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів та одного додатку. Загальний обсяг роботи становить 167 сторінок, у тому числі 143 сторінки основного тексту, 47 рисунків та 12 таблиць. Список використаних джерел містить 110 найменувань, викладених на 14 сторінках.

## ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** проведено аналіз стану загальної проблеми щодо забезпечення якості обслуговування потоків користувачів сучасних та перспективних телекомунікаційних мереж в ході вирішення задач активного управління чергами, розподілу ресурсу та управління перевантаженням в умовах нестационарного режиму роботи мережних інтерфейсів; обґрунтовано актуальність проблематики дослідження; встановлено зв'язок роботи з науковими програмами, темами та планами; сформульовано мету та наукову задачу дисертації; визначено об'єкт,

предмет та методи досліджень; розкрито новизну та практичну значимість отриманих наукових результатів; наведено дані щодо опублікованих за темою дисертаційної роботи праць та їхню апробацію.

У **першому розділі** на основі проведеного аналізу з'ясовано, що технологічні засоби управління трафіком, до яких належать протоколи маршрутизації, механізми управління чергами, профілювання трафіку та резервування ресурсів є ефективним інструментарієм вирішення задач щодо підвищення QoS. Встановлено, що забезпечення збалансованого використання різнорідних мережних ресурсів з підтримкою диференціації обслуговування безпосередньо залежить саме від ефективності роботи механізмів управління чергами. Цей факт обумовив актуальність розробки та вдосконалення математичних моделей та методів управління чергами, покладених в основу даних механізмів та орієнтованих на підвищення рівня якості обслуговування за рахунок забезпечення комплексного вирішення задач активного управління чергами, розподілу ресурсів та управління перевантаженням в умовах нестационарного режиму роботи мережних інтерфейсів та ТКМ в цілому.

У **другому розділі** вдосконалено метод збалансованого управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів телекомунікаційних мереж, який включає у себе два етапи розрахунків. Етап 1 базується на формулюванні та вирішенні оптимізаційної задачі агрегування та розподілу потоків пакетів між сформованими на інтерфейсі маршрутизатора чергами на основі близькості значень їх класів. Етап 2 заснований на розв'язанні оптимізаційної задачі збалансованого розподілу пропускної здатності інтерфейсу маршрутизатора між класовими чергами відповідно до вимог концепції Traffic Engineering. В рамках розробленого методу вважається, що на вхід інтерфейсу маршрутизатора надходять  $N$  потоків пакетів з відомими характеристиками:  $a_i$  – середня інтенсивність  $i$ -го ( $i = \overline{1, N}$ ) потоку,  $(1/c)$ ;  $k_i^f$  – значення класу  $i$ -го потоку пакетів. Чим вище значення класу  $k_i^f$ , тим з вищим рівнем QoS пакети повинні обслуговуватися на інтерфейсі маршрутизатора;  $K$  – максимальне значення класу потоків пакетів. Значення класу  $k_i^f$  кількісно виражається дійсним числом при  $1 \leq k_i^f \leq K$ .

Пакети  $N$  потоків, які надійшли на обслуговування на інтерфейс маршрутизатора, повинні розподілитися між створеними на ньому  $M$  чергами у ході вирішення задачі управління перевантаженням шляхом розрахунку множини керуючих змінних першого типу  $x_{i,j}$  ( $i = \overline{1, N}$ ,  $j = \overline{1, M}$ ), кожна з яких характеризує частку  $i$ -го потоку пакетів, спрямованого на обслуговування до  $j$ -ї черги. Значення класу  $j$ -ї черги  $k_j^q$  відповідає умові  $1 \leq k_j^q \leq K$ . Критерієм направлення потоку пакетів в ту чи іншу чергу буде максимальна близькість значень  $k_i^f$  та  $k_j^q$ . Задача агрегації потоків за чергами буде актуальною у разі виконання умови  $N > M$ .

Для забезпечення виконання умов щодо диференціації обслуговування потоків пакетів з різними QoS-вимогами доцільно здійснювати обробку потоків па-

кетів з близькими значеннями класів  $k_i^f$  в рамках однієї з сформованих на інтерфейсі маршрутизатора телекомунікаційної мережі черг, а керуючі змінні першого типу  $x_{i,j}$  визначити як булеві:

$$x_{i,j} = \{0,1\}. \quad (1)$$

Згідно із фізикою розв'язуваної задачі, на змінні  $x_{i,j}$  також мають накладатися умови збереження потоку на інтерфейсі маршрутизатора телекомунікаційної мережі:

$$\sum_{j=1}^M x_{i,j} = 1, \quad (i = \overline{1, N}). \quad (2)$$

Виконання умов (1) та (2) гарантуватиме, що всі пакети  $i$ -го потоку (без втрат) будуть направлені на обслуговування до однієї з черг, організованих на інтерфейсі маршрутизатора телекомунікаційної мережі. Розрахунок керуючих змінних  $x_{i,j}$  доцільно здійснити у ході розв'язання оптимізаційної задачі першого етапу розрахунків, на основі мінімізації цільової функції  $F$ , представлені лінійною формою виду:

$$F = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M h_{i,j}^x x_{i,j} \rightarrow \min, \quad (3)$$

де  $h_{i,j}^x$  – метрика обслуговування пакетів  $i$ -го потоку  $j$ -ю чергою:

$$h_{i,j}^x = (k_i^f - k_j^q)^2 + 1. \quad (4)$$

Використання (3) з метрикою (4) при обмеженнях (1), (2) дозволяє сформулювати оптимізаційну задачу булевого програмування, в ході розв'язання якої визначається оптимальний порядок агрегування та розподілу потоків пакетів між організованими чергами на основі близькості значень їх класів, що повністю відповідає технологічним вимогам задачі управління перевантаженням (Congestion Management).

Після отримання рішення задачі управління перевантаженням, представленого множиною розрахованих керуючих змінних  $x_{i,j}$ , здійснюється вирішення задачі розподілу пропускної здатності інтерфейсу (Resource Allocation), яка відноситься до другого етапу розрахунків. Для цього введено множину керуючих змінних другого типу  $b_j$ , кожна з яких визначає частку пропускної здатності інтерфейсу, виділену для обслуговування  $j$ -ї черги. Для забезпечення коректності розподілу пропускної здатності інтерфейсу  $b$  між чергами, на змінні  $b_j$  мають накладатися умови вигляду:

$$b_j \geq 0, \quad \sum_{j=1}^M b_j \leq b, \quad (j = \overline{1, M}). \quad (5)$$

Для вирішення задачі оптимального розподілу та балансування пропускної здатності інтерфейсу між сформованими на ньому чергами відповідно до принципів концепції Traffic Engineering в структуру методу додатково введено нелінійну умову запобігання перевантаження черг за пропускною здатністю, що їм виділена:

$$\sum_{i=1}^N a_i x_{i,j} \leq h_j^\alpha \alpha b_j, \quad (j = \overline{1, M}), \quad (6)$$

де  $\alpha$  – керуюча змінна третього типу, яка кількісно пов’язана з верхнім динамічно керованим порогом використання черг за пропускну здатністю інтерфейсу:

$$0 < \alpha \leq 1, \quad (7)$$

де  $h_j^\alpha$  – класовий коефіцієнт, який введено для забезпечення балансування розподілу пропускну здатності інтерфейсу маршрутизатора ТКМ між сформованими на ньому чергами з урахуванням значень їх класів:

$$h_j^\alpha = 1 + \frac{k_j^q}{K \cdot D}, \quad (j = \overline{1, M}), \quad (8)$$

де  $D \geq 1$  – коефіцієнт нормування, який визначає рівень впливу класу черги на класовий коефіцієнт  $h_j^\alpha$  та на процес балансування пропускну здатності інтерфейсу маршрутизатора ТКМ за сформованими чергами в цілому. Чим більше клас черги  $k_j^q$ , тим вище значення класового коефіцієнту  $h_j^\alpha$ . Тому, чим вище  $k_j^q$ , тим меншим буде її коефіцієнт використання  $\rho_j$  при одному й тому ж значенні порогу  $\alpha$ :

$$\rho_j = \frac{\sum_{i=1}^N a_i x_{i,j}}{b_j}, \quad (j = \overline{1, M}). \quad (9)$$

Чим вище значення коефіцієнту нормування  $D$ , тим менше впливатиме клас черги  $k_j^q$  на об’єм виділеної їй пропускну здатності. Отже, саме завдяки введенню виразів (6)-(8) забезпечується диференціація розподілу пропускну здатності інтерфейсу маршрутизатора телекомунікаційної мережі між організованими на ньому класовими чергами. Таким чином, оптимізаційна задача щодо розподілу та балансування пропускну здатності інтерфейсу між сформованими чергами відповідно до принципів концепції Traffic Engineering буде відноситися до класу задач нелінійного програмування, де критерієм оптимальності виступатиме мінімум введеного в (6) порога  $\alpha$ :

$$\min_{b, \alpha} \alpha. \quad (10)$$

Однак формулювання та розв’язання задачі нелінійної оптимізації (5)-(7) суттєво підвищує обчислювальну складність отримання пошукових рішень, представлених змінними  $b_j$  та  $\alpha$ . Зважаючи на це, пропонується підхід до зведення вище сформульованої задачі нелінійної оптимізації до задачі класу лінійного програмування без втрати адекватності та точності кінцевих результатів шляхом наступних перетворень:

$$\frac{\sum_{i=1}^N a_i x_{i,j}}{\alpha} \leq h_j^\alpha b_j, \quad (j = \overline{1, M}). \quad (11) \quad \alpha^* = \frac{1}{\alpha}. \quad (12) \quad \alpha^* > 0. \quad (13)$$

Тоді умова запобігання перевантаження черг при збалансованому розподілі між ними пропускної здатності інтерфейсу маршрутизатора (6) набуде вигляду:

$$\alpha^* \sum_{i=1}^N a_i x_{i,j} \leq h_j^\alpha b_j, \quad (j = \overline{1, M}), \quad (14)$$

а критерієм оптимальності виступати максимум введеного в (12) порога  $\alpha^*$ :

$$\max_{b, \alpha^*} \alpha^*. \quad (15)$$

Формулювання задачі розподілу пропускної здатності інтерфейсу маршрутизатора ТКМ в лінійному вигляді з критерієм (15) та обмеженнями (5), (13), (14) позитивно відображається на алгоритмічно-програмній реалізації отримуваних на практиці розрахункових рішень.

За результатами проведених розрахунків вдалося підтвердити коректність агрегування та розподілу потоків пакетів за відповідними чергами згідно з сумірністю значень їх класів, а також досягти оптимального збалансованого розподілу пропускної здатності інтерфейсу маршрутизатора між сформованими класовими чергами відповідно до принципів концепції Traffic Engineering. Результати дослідження методу підтвердили його ефективність з точки зору боротьби з перевантаженням черг за пропускною здатністю за рахунок більш гнучкого та раціонального розподілу каналного ресурсу.

Так на рис. 1 показано, що черга з найнижчим класом (Черга 1) мала найвищий коефіцієнт використання  $\rho_j$ , і навпаки, черга з найвищим значенням класу (Черга 4) була завантажена найменше. У ході проведеного дослідження також встановлено, що зростання коефіцієнту нормування  $D$  зменшувало вплив класів черг на об'єм виділеної їм пропускної здатності інтерфейсу маршрутизатора ТКМ, та відповідно, на коефіцієнт використання черг.

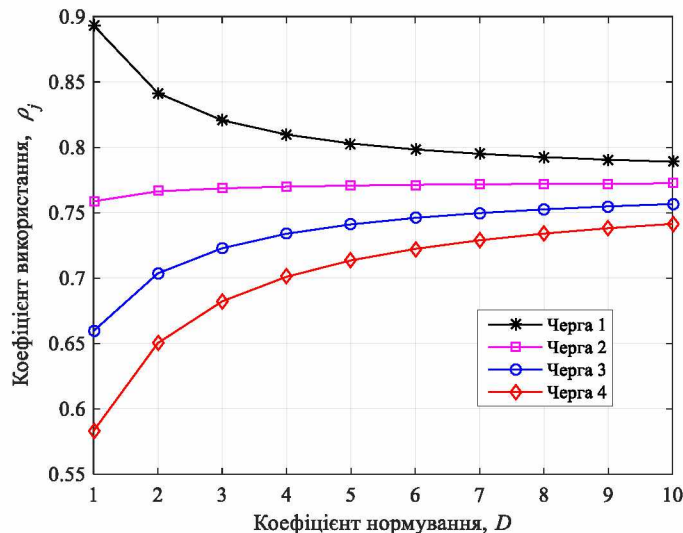


Рис. 1. Аналіз впливу коефіцієнту нормування  $D$  на характер балансування розподілу пропускної здатності інтерфейсу між класовими чергами

Також в **другому розділі** вперше запропоновано метод активного управління чергами та пропускною здатністю інтерфейсів маршрутизаторів телекомунікаційних мереж. За аналогією із методом збалансованого управління чергами

на першому етапі розрахунків вирішувалася оптимізаційна задача управління перевантаженням з використанням критерію оптимальності (3) та метрикою (4) при обмеженнях (1) та (2), тобто результат розрахунку множини керуючих змінних  $x_{i,j}$  був вже відомим. Другий етап розрахунків являв собою комплексне вирішення задач розподілу каналного ресурсу та превентивного відкидання пакетів на інтерфейсі маршрутизатора телекомунікаційної мережі.

У рамках запропонованого методу для вирішення задачі розподілу ресурсів також введено множину керуючих змінних другого типу  $b_j$ , що підпорядковуються умовам (5). Для реалізації превентивного (завчасного) обмеження інтенсивності потоків, що надходять на вхід інтерфейсу маршрутизатора ТКМ, визначено множину керуючих змінних третього типу  $y_i$ , які за своїм фізичним змістом характеризують частку  $i$ -го ( $i = \overline{1, N}$ ) потоку пакетів, що отримала відмову в обслуговуванні на інтерфейсі маршрутизатора ТКМ в ході вирішення задачі активного управління чергами. Чисельно змінні  $y_i$  визначатимуть ймовірність відкидання пакетів  $i$ -го потоку зі сформованої на інтерфейсі маршрутизатора черги та підпорядковуватимуться умові вигляду:

$$0 \leq y_i \leq 1, \quad (i = \overline{1, N}). \quad (16)$$

Умова забезпечення керованості процесом активного управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів ТКМ набуде виду:

$$\sum_{i=1}^N a_i x_{i,j} (1 - y_i) \leq b_j, \quad (j = \overline{1, M}). \quad (17)$$

Виконання (17) гарантуватиме, що сумарна інтенсивність агрегованих згідно метрики (4) потоків пакетів не спричинить перевантаження сформованих черг завдяки реалізації функцій розподілу ресурсів та превентивного відкидання пакетів. Спираючись на сформульовані умови та обмеження (5), (16), (17), розрахунок пошукових змінних  $b_j$  та  $y_i$  доцільно здійснити в ході вирішення оптимізаційної задачі:

$$\min_{b,y} P, \quad (18) \quad P = \sum_{j=1}^M h_j^b b_j + \sum_{i=1}^N h_i^y a_i y_i \rightarrow \min, \quad (19)$$

де  $h_j^b$  – умовна вартість (метрика) виділення пропускну здатності інтерфейсу маршрутизатора  $j$ -й черзі;  $h_i^y$  – умовну вартість (метрика) відмов в обслуговуванні пакетами  $i$ -го потоку.

Як свідчать результати дослідження, використання лінійної цільової функції (19) орієнтує на те, що у випадку перевантаження інтерфейсу маршрутизатора ТКМ пакети потоку з вищим класом обслуговування почнуть відкидатись лише після повного блокування потоків з меншим значенням класу. Таким чином, реалізовуватиметься обслуговування на основі так званих абсолютних пріоритетів. Тому в роботі додатково пропонується підхід, коли в критерії (18) використовується лінійно-квадратична форма:

$$P = \vec{b}^t H_b \vec{b} + \vec{y}^t H_y \vec{y} + \vec{h}_b^t \vec{b} + \vec{h}_y^t \vec{y}, \quad (20)$$

де  $\vec{b}$  та  $\vec{y}$  – вектори з координатами  $b_j$  та  $y_i$  відповідно;  $\vec{h}_b$  та  $\vec{h}_y$  – вектори, координатами яких є  $h_j^b$  та  $a_i h_i^y$  відповідно;  $H_b$  та  $H_y$  – діагональні матриці, на діагоналях яких розташовані координати  $wh_M^b$  та  $wa_N h_N^y$  відповідно,  $w$  – множник балансування, який встановлює співвідношення вагових коефіцієнтів у матрицях  $H_b$ ,  $H_y$  та векторах  $\vec{h}_b$ ,  $\vec{h}_y$ .

Змінюючи множник балансування  $w$ , можна регулювати процес активного управління чергами, в тому числі з точки зору визначення політики диференційованих відмов в обслуговуванні пакетів (рис. 2). У разі перевантаження інтерфейсу, відмови в обслуговуванні будуть носити збалансований характер: відмови стосуватимуться усіх потоків пакетів, однак більшою мірою пакетів з низькокласових черг і меншою – з висококласових. Це дозволило забезпечити більш справедливий (fair) характер відмов в обслуговуванні потоків пакетів.

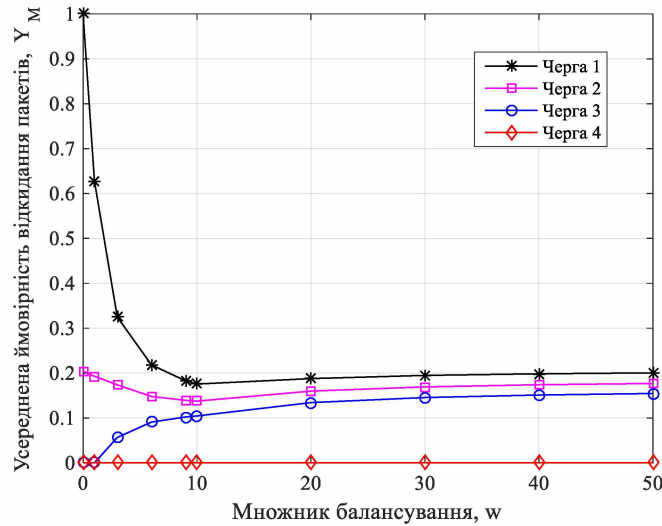


Рис. 2. Аналіз впливу множника балансування  $w$  на характер зміни усередненої ймовірності відкидання пакетів з організованих на інтерфейсі черг

У **третьому розділі** вдосконалено та досліджено динамічну модель управління чергами та пропускну здатністю інтерфейсів маршрутизаторів ТКМ. У рамках запропонованої моделі використовуються позначення  $N$ ,  $M$ ,  $k_i^f$ ,  $k_j^q$ , які були введені в попередньому розділі. Крім того, раніше введені керуючі змінні  $x_{i,j}(t)$  та  $b_j(t)$  стають функцією часу. У рамках динамічної моделі управління чергами визначення порядку агрегації та розподілу потоків за чергами шляхом розрахунку  $x_{i,j}(t)$  залишається незмінним (1)-(4). Розподіл каналного ресурсу інтерфейсу маршрутизатора буде забезпечуватися на підставі розрахунку керуючих змінних  $b_j$ , що відповідають умовам (5). Умова забезпечення керованості процесом запобігання перевантаженню інтерфейсу набуде вигляду:

$$a_j^\Sigma(t) \leq b_j, \quad (j = \overline{1, M}), \quad (21)$$

де  $a_j^\Sigma(t)$  – сумарна інтенсивність потоків пакетів, спрямованих на обслуговування в організовану на інтерфейсі маршрутизатора  $j$ -ту чергу в момент часу  $t$ :

$$a_j^\Sigma(t) = \sum_{i=1}^N a_i(t)x_{i,j}(t), \quad (j = \overline{1, M}). \quad (22)$$

Зважаючи на те, що інтенсивність потоків, які надходять в ту чи іншу сформовану на інтерфейсі чергу, носить випадковий і нестационарний характер, то виконання умови (21) є недостатнім для запобігання перевантаження буфера черги за її довжиною (в пакетах). Тому в структуру динамічної моделі вводяться параметри  $\overline{n}_j(t)$  та  $n_j^{\max}$ , які характеризують значення середньої довжини  $j$ -ї черги в момент часу  $t$  та її максимальне можливе значення відповідно. Тоді доповнимо умови (5), (21)-(22) нелінійним обмеженням вигляду:

$$\overline{n}_j(t) \leq n_j^{\max}, \quad (j = \overline{1, M}). \quad (23)$$

У загальному випадку значення середньої довжини черги  $\overline{n}_j(t)$  буде залежати від характеристик потоків пакетів, які формують  $j$ -ту чергу (інтенсивності та довжини пакетів в потоці); дисципліни обслуговування пакетів; виділеної даній черзі пропускної здатності інтерфейсу маршрутизатора та від моменту часу  $t$ , в який це значення оцінюється.

Додатково введемо в структуру моделі нелінійне обмеження вигляду:

$$k_j^q \overline{n}_j(t) \leq \beta n_j^{\max}, \quad (j = \overline{1, M}), \quad (24)$$

де  $\beta$  – керуюча змінна третього типу, яка визначає верхній динамічно керований поріг завантаженості черг за їх довжиною. Виконання (24) дозволяє забезпечити збалансоване завантаження створюваних на інтерфейсі маршрутизатора черг відповідно до концепції Traffic Engineering, при цьому, чим вище буде значення класу черги  $k_j^q$ , тим меншу середню довжину  $\overline{n}_j(t)$  вона буде мати.

З огляду на те, що процеси оцінки стану інтерфейсу і подальшого управління чергами є процесами реального часу діапазону десятків мілісекунд, необхідним є використання в моделі математичного апарату, який враховуватиме динаміку зміни його стану в часі. На підставі проведеного аналізу запропоновано описувати динамічні властивості моделі нелінійними диференціальними рівняннями стану мережі, що засновані на стаціонарній поточковій апроксимації нестационарного потоку (PSFFA). Так, наприклад, при використанні моделі PSFFA для опису режиму роботи інтерфейсу системою  $M(t)/M(t)/1$  значення середньої довжини черги  $\overline{n}_j(t)$  буде визначатися нелінійними диференціальними рівняннями стану мережі:

$$\frac{d\overline{n}_j(t)}{dt} = a_j^\Sigma(t) - b_j \left( \frac{\overline{n}_j(t)}{\overline{n}_j(t) + 1} \right). \quad (25)$$

Вирішення (25) для оцінки середньої довжини черги  $\overline{n}_j(t)$  за допомогою середовища MATLAB в аналітичному виді набуло наступного вигляду:

$$\begin{aligned} \bar{n}_j(t) = & -(a_j^\Sigma(t) + b_j \cdot W(0, -\exp(-(a_j^\Sigma(t) + (a_j^\Sigma(t) - b_j)^2) \cdot (t - \\ & - (b_j \cdot (\ln(\exp(-(a_j^\Sigma(t) + n_j^0 \cdot (a_j^\Sigma(t) - b_j)) / b_j)) \cdot (a_j^\Sigma(t) + n_j^0 \cdot (a_j^\Sigma(t) - \\ & - b_j))) + a_j^\Sigma(t) / b_j)) / (a_j^\Sigma(t) - b_j)^2)) / b_j) / (b_j)) / (a_j^\Sigma(t) - b_j), \end{aligned} \quad (26)$$

де  $W$  – функція Ламберта;  $\exp$  – експоненціальна функція,  $n_j^0$  – середня довжина черги на момент часу  $t=0$ . Згідно умовам (5), (21)-(24), (26), розрахунок пошукових змінних  $b_j$  та  $\beta$  здійснено в ході розв'язання оптимізаційної задачі:

$$L = \sum_{j=1}^M h_j^b b_j + h^\beta \beta \rightarrow \min, \quad (27)$$

де  $h_j^b$  – умовна вартість виділення одиниці пропускної здатності інтерфейсу маршрутизатора пакетам  $j$ -ї черги;  $h^\beta$  – умовна вартість реалізації процесу балансування довжин черг.

У роботі було проведено аналіз динаміки зміни стану інтерфейсу при його моделюванні за допомогою PSFFA, наприклад, системами  $M(t)/M(t)/1$ ,  $M(t)/D(t)/1$ ,  $M(t)/Ek(t)/1$ . На рис. 3 представлені результати аналізу впливу пропускної здатності (а) та завантаженості черги (б) на динаміку зміни середньої довжини черги на інтерфейсі маршрутизатора ТКМ.

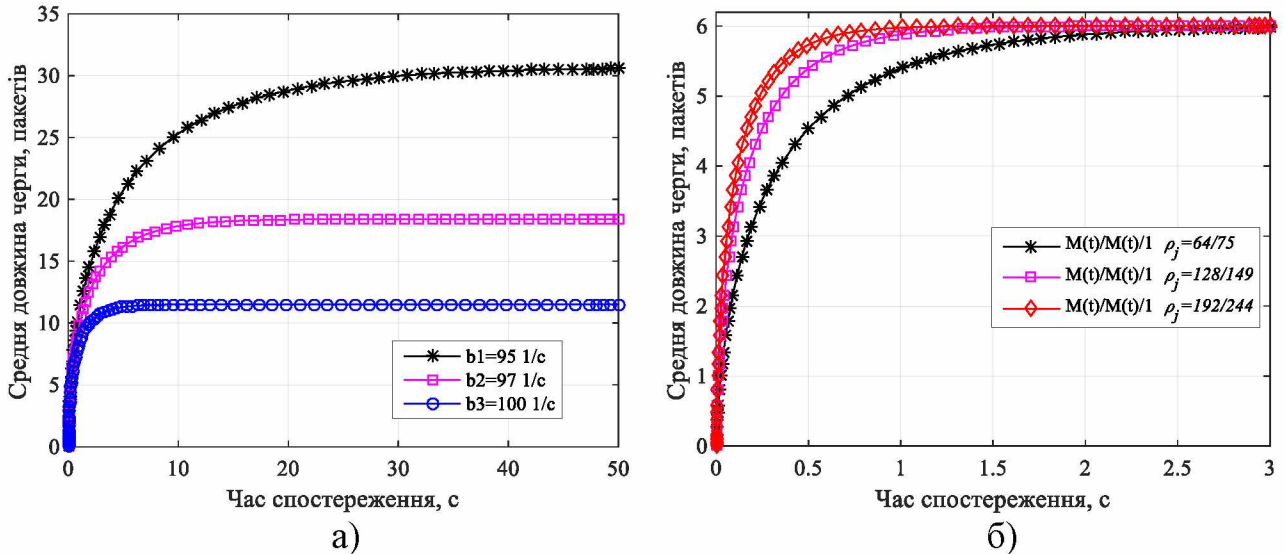


Рис. 3. Аналіз впливу пропускної здатності (а) та завантаженості черги (б) на динаміку зміни середньої довжини черги на інтерфейсі

Як показали результати проведеного аналізу (рис. 3), на тривалість перехідного процесу, окрім виділеної пропускної здатності та завантаженості черг, впливають такі характеристики потоку, як його інтенсивність, середня довжина пакету, а також вид дисципліни обслуговування пакетів. Встановлено, що чим вище виділена черзі пропускна здатність інтерфейсу, тим тривалість перехідного процесу менше (рис. 3а). У свою чергу, агрегування потоків також сприяє зменшенню тривалості перехідного процесу (рис. 3б). З'ясовано, що використання виразів для розрахунку середньої довжини черги, отриманих для стаціонарного

випадку, досить часто дає дуже грубе наближення до істинних значень. Це пов'язано з тим, що середня довжина черги сходиться до свого стаціонарного значення за час, який може складати від одиниць до десятків секунд. Використання PSFFA та (26) дозволило підвищити точність розрахунку середньої довжини черги для моделі  $M(t)/M(t)/1$  від 2,2 до 9 разів, для моделі  $M(t)/D(t)/1$  від 1,5 до 6 разів, а для моделі  $M(t)/Ek(t)/1$  від 1,2 до 5 разів. Найвищий вигравш щодо точності спостерігався в умовах високої динаміки зміни стану інтерфейсу маршрутизатора, тобто при коливаннях параметрів потоків та виділеної черзі пропускної здатності. Більш точні дані про середню довжину черги в заданий момент часу сприяли забезпеченню більш ефективного використання буферних та каналних ресурсів ТКМ. Це проявлялося в економії пропускної здатності інтерфейсу в середньому на 7-15% при довжинах черг від 5 до 15 пакетів, та 15-26% при довжинах черг від 15 до 30 пакетів порівняно із стаціонарним режимом роботи мережних інтерфейсів ТКМ.

Адекватність запропонованої динамічної моделі та оцінка достовірності отримуваних з її допомогою результатів підтверджувалися на підставі їх порівняння з результатами імітаційного моделювання в пакеті Simulink. Структурна схема імітаційної моделі функціонування інтерфейсу маршрутизатора телекомунікаційної мережі наведена на рис. 4.

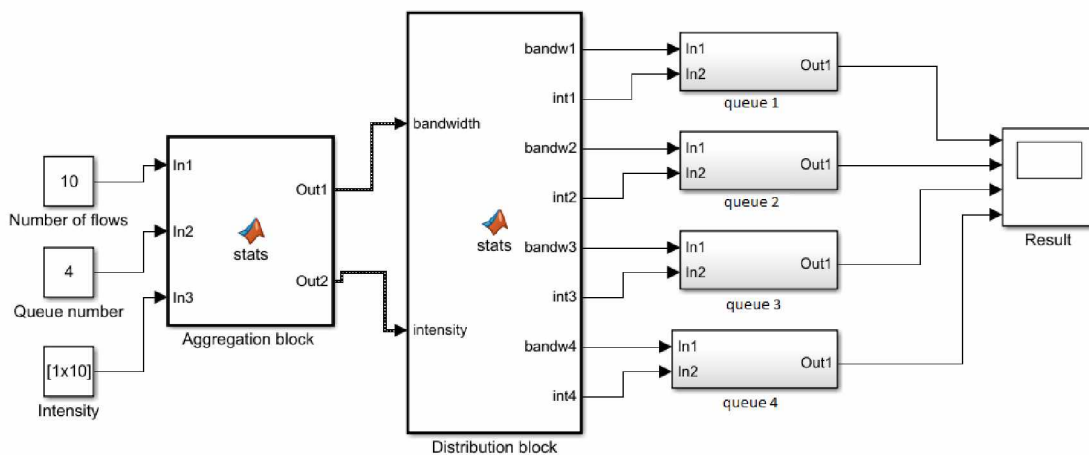


Рис. 4. Структурна схема імітаційної моделі функціонування інтерфейсу маршрутизатора ТКМ (Interface Model)

Розбіжність результатів аналітичного та імітаційного моделювання в рамках розглянутих у третьому розділі прикладів не перевищувала 1,2%.

У четвертому розділі була перевірена адекватність та ефективність запропонованих у другому розділі рішень шляхом їхнього порівняння з механізмами WFQ/WRED за середньою затримкою (рис. 5) та ймовірністю відкидання пакетів з черги. Ці дослідження ґрунтувалися на результатах проведеного на обладнанні компанії Cisco Systems лабораторного експерименту. Зміні підлягали пропускна здатність інтерфейсу; кількість потоків пакетів, що надходили на його вхід, значення їхніх класів та інтенсивностей; кількість сформованих на них черг та їхня класифікація. Результати дослідження підтвердили ефективність методу збалан-

сованого управління чергами з точки зору покращення середньої затримки пакетів – від 12-17% до 22-25% для високопріоритетних потоків (EF, AF41-43) та від 8-12% до 16-19% – для низькопріоритетних потоків (AF11-13). Використання методу активного управління чергами дозволило знизити ймовірність втрат пакетів на 7-12% для високопріоритетних потоків (EF, AF41-43) та на 10-17% – для низькопріоритетних потоків (AF11-13). З'ясовано, що рекомендована область застосування отриманих у роботі моделей та методів управління чергами – області високої завантаженості (більше 80-85%) та перевантаження інтерфейсів, особливо в умовах високої динаміки зміни їх стану.

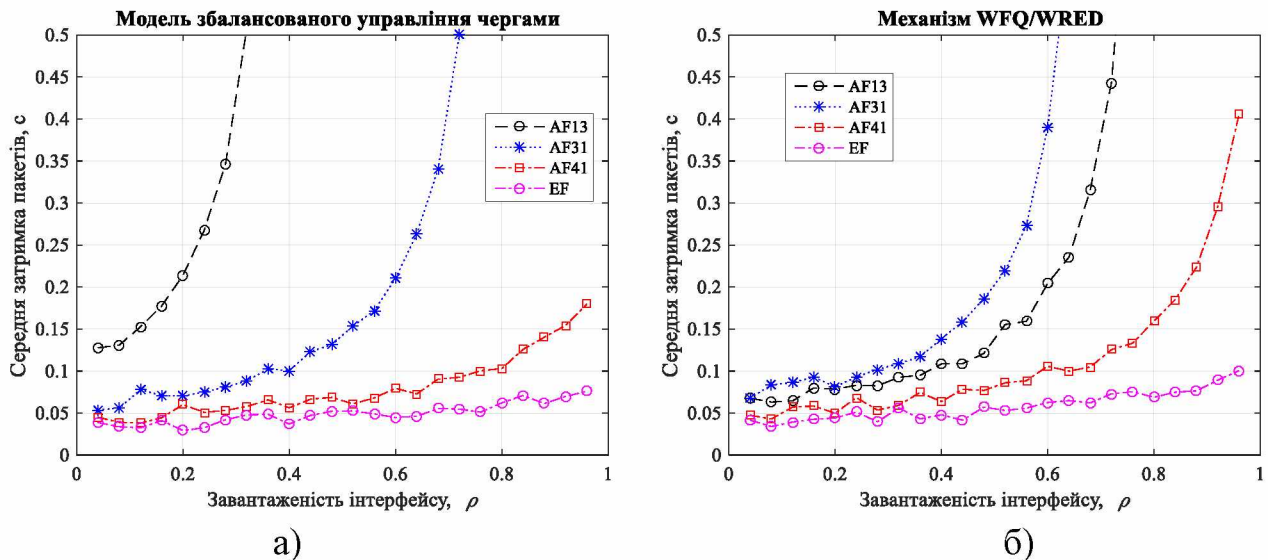


Рис. 5. Аналіз впливу завантаженості інтерфейсу на середню затримку пакетів при генерації трафіка з різними значеннями поля DSCP при зростанні кількості низькопріоритетних потоків для методу збалансованого управління чергами (а) та механізму WFQ/WRED (б)

## ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну **науково-прикладну задачу**, пов'язану з оптимізацією процесів активного управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів телекомунікаційних мереж за рахунок забезпечення комплексного вирішення задач управління та запобігання перевантаженням, а також розподілу каналного ресурсу в умовах високої динаміки зміни стану мережних інтерфейсів, шляхом розробки нових та вдосконалення вже існуючих математичних моделей та методів, орієнтованих на підвищення рівня якості обслуговування в ТКМ в цілому. За підсумками проведених досліджень та результатами розв'язання поставленої наукової задачі можна зробити ряд важливих висновків.

1. На основі проведеного аналізу з'ясовано, що технологічні засоби управління трафіком, до яких належать протоколи маршрутизації, механізми управління чергами, профілювання трафіку та резервування ресурсів є ефективним інструментарієм вирішення задач щодо підвищення якості обслуговування. Встановлено, що забезпечення збалансованого використання різнорідних мережних ресурсів з підтримкою диференціації обслуговування за множиною QoS-

показників безпосередньо залежить саме від ефективності роботи механізмів управління чергами. Це обумовлює актуальність розробки та вдосконалення математичних моделей та методів управління чергами, покладених в основу даних механізмів.

2. Вдосконалено метод збалансованого управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів телекомунікаційних мереж. Новизна рішень полягає, по-перше, у забезпеченні узгодженого, заснованого на послідовному розв'язанні оптимізаційних задач агрегування потоків пакетів за чергами та розподілу між ними пропускної здатності інтерфейсу, що дозволило значно скоротити розмір задачі управління чергами та знизити обчислювальну складність кінцевих рішень без зниження рівня їхньої ефективності; по-друге, в збалансованому розподілі пропускної здатності інтерфейсу маршрутизатора між чергами пакетів відповідно до значень класів черг та потоків, що дозволило забезпечити підвищення якості диференційованого обслуговування пакетів.

3. Уперше запропоновано метод активного управління чергами та пропускною здатністю інтерфейсів маршрутизаторів телекомунікаційних мереж. Новизна методу полягає в погодженому розв'язанні оптимізаційних задач щодо розподілу пропускної здатності інтерфейсу між сформованими чергами та заснованого на пріоритетах обмеження інтенсивності потоків пакетів, що надходять на інтерфейс маршрутизатора. Застосування методу дозволяє в залежності від виду використаного критерію оптимальності отримуваних рішень реалізувати політику диференційованих відмов в обслуговуванні пакетів на основі як абсолютних, так і відносних пріоритетів.

4. Удосконалено динамічну модель управління чергами та пропускною здатністю інтерфейсів маршрутизаторів телекомунікаційних мереж. Новизна моделі полягає в тому, що під час розподілу пропускної здатності інтерфейсу маршрутизатора враховується динаміка зміни його стану в часі, яка описувалась нелінійними диференціальними рівняннями, заснованими на стаціонарній поточковій апроксимації нестационарного потоку (PSFFA). Це дозволило більш адекватно розрахувати середню довжину кожної з черг в заданий момент часу, що сприяло ефективнішому розподілу між ними пропускної здатності інтерфейсу та підвищенню рівня якості обслуговування в мережі в цілому. Так, економія каналного ресурсу в середньому складала 7-15% при довжинах черг від 5 до 15 пакетів, та 15-26% при довжинах черг від 15 до 30 пакетів порівняно із стаціонарним режимом роботи мережних інтерфейсів ТКМ. Адекватність запропонованої динамічної моделі управління чергами та пропускною здатністю інтерфейсів та оцінка достовірності отримуваних з її допомогою результатів підтверджувалася на підставі їхнього порівняння з результатами імітаційного моделювання в пакеті Simulink. Розбіжність результатів аналітичного та імітаційного моделювання в рамках розглянутих прикладів не перевищувала 1,2%.

5. Для перевірки адекватності запропонованих в дисертаційній роботі рішень щодо збалансованого та активного управління чергами та пропускною здатністю інтерфейсів телекомунікаційних мереж з точки зору основних показників якості обслуговування було проведено лабораторний експеримент на обладнанні

компанії Cisco Systems. У ході експерименту доведена ефективність методу збалансованого управління чергами з точки зору покращення середньої затримки пакетів та ймовірності відкидання пакетів для методу активного управління чергами. Розроблено рекомендацій щодо практичного застосування запропонованих в дисертації результатів у сучасних та перспективних телекомунікаційних мережах, що підтверджується чотирма актами впровадження.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Еременко А.С., Лебеденко Т.Н., Старкова Е.В. Анализ влияния состояния интерфейса на динамику загрузки очереди на маршрутизаторе телекоммуникационной сети. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2015. №3. С. 45-51.

2. Єременко О.С., Лебеденко Т.М., Каплун С.А., Костенко В.О. Імітаційна модель функціонування інтерфейсів маршрутизаторів телекомунікаційних мереж, побудована з використанням пакета Simulink. *Проблеми телекомунікацій*. 2017. №2 (21). С. 61-72. URL: [http://pt.journal.kh.ua/2017/2/1/172\\_yeremenko\\_simulink.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2017/2/1/172_yeremenko_simulink.pdf).

3. Лемешко А.В., Лебеденко Т.Н. Линейная модель оптимального управления очередями на интерфейсе маршрутизатора телекоммуникационной сети. *Information Content and Processing*. 2017. Vol. 4, №2. С. 171-181.

4. Lemeshko O., Lebedenko T., Yeremenko O., Simonenko O. Mathematical Model of Queue Management with Flows Aggregation and Bandwidth Allocation. *International Conference on Theory and Applications of Fuzzy Systems and Soft Computing, Springer, Cham*. 2018. P. 165-176. DOI:10.1007/978-3-319-91008-6\_17. (SCOPUS)

5. Лебеденко Т.Н., Симоненко А.В. Динамическая модель управления очередями на интерфейсе маршрутизатора телекоммуникационной сети. *Радиоэлектроника и информатика*. 2018. №1. С. 13-18.

6. Лебеденко Т.М., Мокряк А.А., Симоненко О.В., Черкасов А.В., Власенко А.О. Вдосконалення та дослідження методу збалансованого управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів телекомунікаційної мережі. *Проблеми телекомунікацій*. 2018. №2 (23). С. 62-74. URL: [http://pt.journal.kh.ua/2018/2/1/182\\_lebedenko\\_queue.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2018/2/1/182_lebedenko_queue.pdf).

7. Lebedenko T. Method of Scheduling and Active Queues Management on Routers Interfaces of Telecommunication Networks. *Innovative Technology and Scientific Solutions for Industries*. 2019. 2 (8). P. 54-61. DOI: 10.30837/2522-9818.2019.8.054.

8. Лебеденко Т.М., Головешко М.В., Холодкова А.В. Дослідження методу активного управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів телекомунікаційних мереж. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2019. №4 (56). С. 57-62. DOI:10.26906/SUNZ.2019.4.057.

9. Yeremenko O., Lebedenko T., Vavenko T., Semenyaka M. Investigation of Queue Utilization on Network Routers by the Use of Dynamic Models. *Problems of Infocommunications Science and Technology (PICS&T'2015)*: Proceedings of the

Second International Scientific-Practical Conference (Kharkiv, Ukraine, 13-15 October, 2015). Kharkiv: Kharkiv National University of Radio Electronics, 2015. P. 46-49. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2015.7357265. (SCOPUS)

10. Lebedenko T., Simonenko A., Fouad Abdul Razzaq Arif. A Queue Management Model on the Network Routers Using Optimal Flows Aggregation. *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science (TCSET'2016)*: Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Conference (Lviv-Slavske, Ukraine, 23-26 February 2016). Lviv, 2016. IEEE, 2016. P. 605-608. DOI: 10.1109/TCSET.2016.7452129. (SCOPUS)

11. Lebedenko T., Yeremenko O., Harkusha S., Ali Salem Ali. Dynamic Model of Queue Management Based on Resource Allocation in Telecommunication Networks. *Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications, and Computer Engineering (TCSET'2018)*: Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Conference (Lviv-Slavske, Ukraine, 20-24 February 2018). Lviv, 2018. IEEE, 2018. P. 1035-1038. DOI: 10.1109/TCSET.2018.8336371. (SCOPUS)

12. Yeremenko O., Lebedenko T., Mersni A. Features of Dynamic Modeling of Routers Operation Modes in Simulink. *Problems of Infocommunications. Science and Technology (PICS&T'2018)*: Proceedings of the Fifth International Scientific-Practical Conference (Kharkiv, Ukraine, 9-12 October 2018). Kharkiv, 2018. IEEE, 2018. P. 520-524. DOI: 10.1109/INFOCOMMST.2018.8632061. (SCOPUS)

13. Lemeshko O., Lebedenko T., Nevzorova O., Snihurov A., Mersni A., Aymen Al-Dulaimi. Development of the Balanced Queue Management Scheme with Optimal Aggregation of Flows and Bandwidth Allocation. *The Experience of Designing and Application of CAD System in Microelectronic (CADSM'2019)*: Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Conference, (Polyana-Svalyava, Zakarpattya, Ukraine, 26 February - 2 March 2019). Polyana-Svalyava, 2019. IEEE, 2019. P. 3/63-3/66. DOI: 10.1109/CADSM.2019.8779246. (SCOPUS)

14. Lemeshko O., Lebedenko T., Aymen Al-Dulaimi. Improvement of the Method of Balanced Queue Management on the Routers Interfaces of the Telecommunication Networks. *Advanced Information and Communication Technologies (AICT'2019)*: Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Conference, (Lviv, Ukraine, 2-6 July 2019). Lviv, 2019. IEEE, 2019. P. 170-175. DOI: 10.1109/AIACT.2019.8847749. (SCOPUS)

15. Спосіб динамічного управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів телекомунікаційної мережі: патент 136093 Україна: МПК (2019.01) G 06 G 3/00. № u201811916; заявка 03.12.2018; опуб. 12.08.2019, бюл. №15. 4с.