

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

СИМОНЕНКО Олександр Вікторович

УДК 621.391

**ПОТОКОВІ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ УПРАВЛІННЯ
ЧЕРГАМИ НА ІНТЕРФЕЙСАХ МАРШРУТИЗАТОРІВ
ТРАНСПОРТНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ**

05.12.02 – Телекомунікаційні системи та мережі

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Харків – 2016

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,
професор кафедри телекомунікаційних систем.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
МОЖАЄВ Олександр Олександрович,
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»,
професор кафедри «Мультимедійні інформаційні
технології і системи»;
кандидат технічних наук,
СТАРКОВА Олена Володимирівна,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»,
асистент кафедри звукотехніки та реєстрації інформації.

Захист відбудеться «27» квітня 2016 року о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.09 в Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Науки, 14.

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

Автореферат розісланий « 26 » березня 2016 року.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

О.Б. Ткачова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Системоутворюючим каркасом інфокомунікаційних рішень традиційно виступають телекомунікаційні системи та мережі, які повинні бути мультисервісними, тобто забезпечувати надання одночасно множини сервісів на базі єдиної транспортної платформи. При виборі транспортної телекомунікаційної технології (IP, ATM, MPLS/GMPLS) в цілому і конкретних мережних протоколів зокрема важливим є врахування їх можливостей щодо підтримки та забезпечення якості обслуговування (Quality of Service, QoS). З огляду на особливу затребуваність QoS із «кінця в кінець» в архітектурі управління трафіком важливу роль відіграють задачі управління чергами, тому що саме неефективне управління цим ресурсом призводить до неконтрольованого зростання затримок і рівня втрат пакетів.

Як показав проведений аналіз, в сучасному комутаційному обладнанні реалізовано множину механізмів управління чергами як з точки зору їх формування та обслуговування, так і запобігання перевантаженню. Їх відмітною особливістю та ключовим недоліком є переважання ручних налаштувань в ході конфігурації обладнання, що не дозволяє оперативно реагувати на зміну стану інтерфейсів маршрутизатора та мережі в цілому, а також на варіацію характеристик трафіку. У зв'язку з цим багато вітчизняних і зарубіжних учених активно працюють над вдосконаленням засобів управління трафіком і забезпечення якості обслуговування, зокрема і в напрямку перегляду моделей, методів і самих механізмів управління чергами на маршрутизаторах мережі. До їх складу варто віднести, перш за все, Беркман Л.Н., Поповського В.В., Лемешка О.В., Романова А.І, Ложковського А.Г., Климаша М.М., Польщикова К.О., Stein С., Burns А., Ling Wang, Yihan Li, Shivendra Panwar і багато інших.

Перспективним напрямком підвищення ефективності управління чергами є забезпечення узгодженості рішень окремих, але взаємопов'язаних між собою інтерфейсних задач. До їх числа, насамперед, відносяться класифікація та маркування пакетів; створення та налаштування системи черг на інтерфейсі; агрегування потоків і розподіл пакетів за чергами інтерфейсу (Congestion Management) з урахуванням параметрів переданих потоків, вимог до якості обслуговування, характеристик створюваних черг та інтерфейсу в цілому; визначення порядку обслуговування черг, тобто встановлення черговості передачі пакетів з черг в канал зв'язку; розподіл пропускної здатності інтерфейсу між окремими чергами (Resource Allocation); превентивне обмеження довжини черги (Congestion Avoidance). Крім цього нові рішення в цій галузі повинні відповідати таким вимогам: врахування потокової структури сучасного мережного трафіку, обумовленого зростанням загальної кількості мультимедіа додатків в

переліку інфокомунікаційних послуг; оптимізаційна постановка та розв'язання задач управління чергами, що пов'язано з необхідністю збалансованого використання доступного мережного ресурсу; підтримка диференціації обслуговування пакетів на інтерфейсах маршрутизаторів телекомунікаційних мереж (ТКМ) відповідно до їх QoS-вимог; реалізація динамічних стратегій управління чергами; простота алгоритмічно-програмної та апаратної реалізації.

У зв'язку з цим актуальною є *наукова задача*, пов'язана з оптимізацією процесу управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів на основі забезпечення узгодженого розв'язання задач щодо агрегування потоків, розподілу пакетів між чергами та виділення чергам пропускну здатності інтерфейсу шляхом розробки відповідних математичних моделей і методу для підвищення якості обслуговування в транспортних ТКМ в цілому.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана згідно з вимогами положень «Концепції конвергенції телефонних мереж і мереж з пакетною комутацією в Україні», «Основних засад розвитку інформаційного суспільства в Україні на 2007-2015 роки», «Концепції національної інформаційної політики» та «Концепції Національної програми інформатизації». Запропоновані поточкові моделі та метод управління чергами використані в навчальному процесі кафедри телекомунікаційних систем ХНУРЕ і при модернізації та розвитку телекомунікаційної системи ТОВ «Сигма СОФТВЕА».

Мета дисертаційної роботи полягає в підвищенні якості обслуговування в транспортній ТКМ на основі вдосконалення математичних моделей і методів управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів. Для розв'язання наукової задачі в дисертаційній роботі розв'язані наступні окремі задачі дослідження:

- аналіз протокольних рішень з управління трафіком і чергами на інтерфейсах маршрутизаторів транспортних ТКМ;
- огляд відомих теоретичних рішень, математичних моделей і методів управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів транспортних ТКМ;
- формулювання вимог до перспективних рішень в області управління чергами на маршрутизаторах ТКМ;
- вдосконалення поточкових моделей і методу управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів транспортних ТКМ;
- аналіз адекватності та дослідження ефективності запропонованих в дисертації рішень з управління чергами;
- розробка рекомендацій щодо практичного використання отриманих в роботі результатів у сучасних і перспективних транспортних ТКМ.

Об'єкт дослідження – процеси управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів транспортних телекомунікаційних мереж.

Предмет дослідження – математичні моделі та методи управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів транспортних телекомунікаційних мереж.

Методи дослідження. У дисертації знайшла своє застосування система аналітичних та імітаційних методів дослідження, а також методи лабораторного експерименту. При цьому в ході вдосконалення моделей управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів ТКМ використані можливості теорії масового обслуговування та апарату математичного програмування. В ході порівняльного аналізу запропонованих і раніше відомих рішень з управління чергами використані засоби імітаційного моделювання. Для підтвердження адекватності запропонованих моделей і методу, а також для перевірки достовірності отриманих результатів в роботі проводився лабораторний експеримент.

Наукова новизна отриманих результатів. При розв'язанні сформульованої наукової задачі у роботі отримано нові наукові результати:

1. Отримала подальший розвиток потокова модель управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів транспортних телекомунікаційних мереж. Новизна моделі полягає в тому, що в ній в ході управління чергами здійснюється оптимальне агрегування та розподіл потоків на підставі порівняння та мінімізації розбіжності класів потоків і черг, в які вони направляються. Використання моделі дозволило в більшості випадків скоротити число підтримуваних черг на інтерфейсі без зниження рівня диференціації якості обслуговування, що сприяло мінімізації часу обробки пакетів на інтерфейсі та зниженню їх міжкінцевої затримки в мережі в цілому.

2. Отримала подальший розвиток модель управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів активних мереж. Новизна моделі полягає в тому, що в ході обслуговування пакетів враховуються не тільки кількість і параметри потоків і черг, а й характеристики активних процесорів (тип, завантаженість та продуктивність), що входять в архітектуру маршрутизатора активної мережі. Реалізація запропонованої моделі дозволила забезпечити більш ефективне використання буферного й обчислювального ресурсу маршрутизатора активних мереж.

3. Удосконалено метод управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів транспортних телекомунікаційних мереж. Новизна методу полягає в тому, що за його допомогою оптимізується робота інтерфейсу в ході узгодженого розв'язання задач щодо агрегування потоків, розподілу пакетів по чергах і виділення чергам необхідної пропускної здатності інтерфейсу, а також задач по залученню та контролю використання активних процесорів маршрутизатора.

Достовірність та обґрунтованість отриманих наукових результатів забезпечувалася та підтверджувалася коректним застосуванням основних положень відомого та добре апробованого математичного апарату, ретельним аналітичним і числовим обґрунтуванням прийнятих наближень і припущень, чіткою фі-

зичною інтерпретацією отриманих результатів розрахунків. Достовірність результатів роботи також визначалася допустимою розбіжністю результатів аналітичного моделювання та проведеного в роботі лабораторного експерименту.

Наукове значення результатів дисертаційної роботи полягає в узагальненні та подальшому розвитку математичних моделей і методів управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів і трафіком у ТКМ в цілому. Використання запропонованих моделей дозволило надати динамічний характер рішенням з управління мережним (канальним і буферним) ресурсом, які повинні прийти на зміну існуючим квазістатичним схемам обробки пакетів.

Практична значимість дисертаційної роботи полягає в можливості безпосереднього використання запропонованих потокових моделей і методу при впровадженні перспективних мережних технологій та окремих механізмів управління чергами на маршрутизаторах як звичайних (традиційних), так і активних ТКМ. Розроблені моделі та метод отримали свою програмну реалізацію в середовищі MatLab та апробовані в ході лабораторного експерименту на реальному мережному обладнанні транспортних ТКМ. Крім того, результати дисертації використані при модернізації та розвитку телекомунікаційної системи ТОВ «Сигма СОФТВЕА» і в навчальному процесі кафедри телекомунікаційних систем ХНУРЕ в дисципліні «Системи комутації та розподілу інформації, частина 2». За результатами дисертаційних досліджень також отримано два патенти на корисну модель (47461, № у 2009 05821 та 70088, № у 201113675).

Особистий вклад здобувача. Всі основні наукові результати, викладені в дисертаційній роботі, здобувач отримав самостійно. Крім того, в роботі [1] автором запропонована потокова модель управління чергами на інтерфейсі маршрутизатора активної мережі; в статті [2] здобувачем проведено порівняння розмірності оптимізаційних задач з управління чергами при статичному та динамічному розподілі пропускну здатності інтерфейсу в залежності від кількості черг і числа пріоритетів пакетів; в публікації [3] автором запропонована потокова модель управління чергами з динамічним розподілом пропускну здатності інтерфейсу; в роботі [4] автором запропонована потокова модель управління чергами з введенням умов щодо недопущення їх перевантаження не тільки за пропускну здатністю, але й за її довжиною; в статті [5] здобувач сформулював задачу управління чергами у вигляді задачі оптимального балансування їх довжини; в публікації [6] автором здійснено аналіз відомих механізмів з управління чергами та сформульовані вимоги, що пред'являються до перспективних рішень в цій галузі; в роботах [7, 8] здобувач виконав дослідження методу управління чергами, що базувався на використанні різних за своєю складністю та функціональністю математичних моделей; в статті [9] автором проаналізовано питання взаємодії процесів маршрутизації та балансування черг на інтерфейсах

маршрутизаторів ТКМ; в роботі [10] здобувач розглянув можливості реалізації активного управління чергами за допомогою потокових моделей; в статті [11] автором запропонована математична модель управління чергами на маршрутизаторах телекомунікаційної мережі на основі оптимального агрегування потоків і розподілу пакетів за чергами.

Апробація основних положень дисертаційної роботи проводилася в ході двадцяти двох наукових конференцій, форумів і семінарів [33-44], серед яких: VII і VIII Міжнародні науково-технічні конференції "Перспективні технології в засобах передачі інформації", 2007 р., 2009 р. (Володимир, ВДУ); другий науково-практичний семінар молодих вчених і студентів "Сучасні телекомунікаційні та інформаційні технології", 12-14 грудня 2007 р. (Київ, УНДІЗ); чотирнадцята міжнародна науково-технічна конференція студентів та аспірантів "Радіоелектроніка, електротехніка та енергетика", 28-29 лютого 2008 р. (Москва, МЕІ); друга науково-технічна конференція "Проблеми телекомунікацій", 20-23 травня 2008 р. (Київ, НТУУ "КПІ"); XII і XIII Міжнародні молодіжні форуми "Радіоелектроніка і молодь в ХХІ столітті", 2008 р., 2009 р. (Харків, ХНУРЕ); третій і четвертий Міжнародні радіоелектронні форуми "Прикладна радіоелектроніка. Стан і перспективи розвитку", 2008 р., 2011 р. (Харків: АНПРЕ, ХНУРЕ); з 5-ї по 9-у наукові конференції Харківського університету Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба "Новітні технології – для захисту повітряного простору", 2009-2013 рр. (Харків, ХУ ПС); науково-практична конференція «Сучасні проблеми телекомунікацій», 28-30 жовтня 2010 р., (Львів, НУ "Львівська політехніка"); науково-технічна конференція з міжнародною участю "Комп'ютерне моделювання в наукоємних технологіях" (КМНТ-2010), Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, 18-21 травня 2010 р. (Харків, ХНУ); V Міжнародна науково-технічна конференція "Сучасні проблеми та досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій", 22-24 вересня 2010 р. (Запоріжжя, ЗНТУ); Науково-практичний семінар молодих вчених і студентів "Сучасні телекомунікаційні та інформаційні технології", №1, 2010 р. (Київ, УНДІЗ); восьма Міжнародна науково-технічна конференція "Сучасні інформаційно-комунікаційні технології" – COMINFO'2012 – Livadia, 1-5 жовтня 2012 р., (Крим-Ялта-Лівадія: ДУІКТ); 23-я Міжнародна Кримська конференція «СВЧ-техніка та телекомунікаційні технології», 8-13 вересня 2013 р. (Севастополь, Севастопольський національний технічний університет); 12-а та 15-а Міжнародні науково-технічні конференції «The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2013)», 2013 р., 2015 р. (Львів, Національний університет "Львівська політехніка").

Публікації. Основні положення дисертації знайшли своє відображення у 35 наукових роботах. Серед публікацій 11 статей, з яких вісім в наукових фахо-

вих виданнях, затверджених МОН України [1-7, 11], три статті [8-10] в іноземних виданнях телекомунікаційної спрямованості, що входять до наукометричних баз e-library (РИНЦ) і Google Scholar. Крім того, матеріали дисертації опубліковані в 22 матеріалах і тезах доповідей на науково-технічних конференціях і форумах [12-33], з яких три конференції проходили під егідою IEEE [30, 32, 33] і викладені в наукометричних базах Scopus та IEEE Xplore Digital Library, а три конференції проходили за кордоном [12, 14, 20]. Здобувач також має два патенти на корисну модель [34, 35].

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів та двох додатків. Загальний обсяг роботи становить 155 сторінок, у тому числі 152 сторінки основного тексту, 30 рисунків та 10 таблиць. Список використаних джерел містить 102 найменування, викладених на 10 сторінках.

ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** розкрито основний зміст і загальний стан проблеми та окремих задач щодо управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів транспортних телекомунікаційних мереж, обґрунтовано актуальність проблематики досліджень, зазначено зв'язок результатів дисертаційної роботи з науковими програмами і темами, сформульовано мету та задачі дослідження, визначено об'єкт, предмет та методи дослідження, розкрито ступінь наукової новизни та рівень практичного значення результатів, отриманих у дисертаційній роботі.

У **першому розділі** на підставі проведеного аналізу існуючих технологічних рішень щодо управління трафіком та забезпечення якості обслуговування зазначено, що значення таких ключових QoS-показників, як середня затримка, джитер, ймовірність втрат пакетів та продуктивність ТКМ в цілому багато в чому залежить від ефективності організації процесів управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів транспортних телекомунікаційних мереж. Саме перевантаження каналів зв'язку та буферу черг на інтерфейсах маршрутизаторів призводить до неконтрольованого зростання затримок пакетів та втрат пакетів. У ході класифікації механізмів управління чергами встановлено, що до основних недоліків існуючих технологій слід віднести неузгодженість рішень окремих інтерфейсних задач та переважання ручних налаштувань в ході конфігурації обладнання, що знижує оперативність реакції мережі на завантаженість інтерфейсів її маршрутизаторів, на зміну характеристик трафіку.

Визначено, що основною причиною неефективності існуючих рішень щодо управління чергами є недосконалість математичних моделей та методів, на яких вони базуються. У розділі на основі аналізу зазначених недоліків існуючих технологічних рішень сформульовано перелік вимог, що висуваються до перс-

пективних механізмів управління чергами, до яких, перш за все, відносяться врахування потокової структури сучасного мережного трафіку; оптимізаційна постановка та розв'язання задач управління чергами; підтримка диференціації обслуговування пакетів на інтерфейсах маршрутизаторів ТКМ; реалізація динамічних стратегій управління; простота алгоритмічно-програмної та апаратної реалізації. Показано, що задоволення цих вимог доцільно проводити шляхом вдосконалення та/або розробки нових математичних моделей та методів управління чергами, що й підтверджує актуальність тематики дисертаційної роботи.

У **другому розділі** отримала подальший розвиток потокова модель управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів ТКМ на основі оптимального агрегування потоків і розподілу пакетів за чергами. Її розробка викликана тим, що в ході управління чергами при налаштуванні інтерфейсу маршрутизатора виходять з двох суперечливих вимог. З одного боку, число використовуваних черг на інтерфейсі має бути максимальним, тобто прагнути до кількості переданих через нього потоків для забезпечення максимально можливої диференціації в обслуговуванні. Але зі збільшенням числа підтримуваних черг помітно зростають і затримки, що вносяться планувальником пакетів, які пов'язані з формуванням черг, аналізом їх стану і т.ін. Раціональний вихід із ситуації бачиться в тому, щоб потоки агрегувались за рядом ключових параметрів, пов'язаних з їх класифікаційними ознаками і вимогами до рівня QoS, що націлене на обґрунтоване скорочення числа використовуваних черг із забезпеченням приблизно однакового рівня якості обслуговування для агрегованих потоків в одній черзі.

В рамках моделі прийняті наступні позначення: M – загальна кількість потоків пакетів, що надходять на інтерфейс маршрутизатора; a_i – величина середньої інтенсивності i -го потоку ($1/c$); $K_i = \{k_i^l, l = \overline{1, L}\}$ – множина параметрів пакетів i -го потоку, які використовуються для класифікації мережного трафіка; L – число параметрів пакету, що використовуються для класифікації трафіка. Для кожного i -го потоку на основі аналізу множини параметрів $\{k_i^l, l = \overline{1, L}\}$ визначається його клас k_i^{II} , який є деякою функцією елементів множини K_i . У загальному випадку величина k_i^{II} є безрозмірною, а для зручності подальшого викладу вважатимемо, що k_i^{II} нормується в межах від одиниці до десяти. Найважливіший потік буде мати максимальне значення класу, тобто $k_i^{\text{II}} = 10$. У роботі наведено ряд прикладів розрахунку k_i^{II} .

Позначимо через N загальну кількість черг, що створюються на інтерфейсі. В рамках подальшого викладу вважалось, що число потоків перевищує кількість підтримуваних на інтерфейсі черг, тобто $M > N$. За аналогією з класифі-

кацією потоків пакетів при управлінні чергами для них також встановлюється система класів k_j^u ($j = \overline{1, N}$), як, наприклад, в механізмах CBQ, CBWFQ і LLQ. Величини k_i^u також рівномірно розподіляються (від 1 до 10) між чергами.

Нехай $x_{i,j}$ ($i = \overline{1, M}$, $j = \overline{1, N}$) – це керуюча змінна, що визначає розв’язання задачі Congestion Management та характеризує долю i -го потоку, направленою на обслуговування в j -ту чергу. Для розв’язання задачі розподілу пропускної здатності (ПЗ) інтерфейсу між чергами (Resource Allocation) необхідно розрахувати множину змінних b_j ($j = \overline{1, N}$), кожна з яких визначає величину пропускної здатності інтерфейсу, що виділяється для обслуговування пакетів з j -ї черги. Крім того, для реалізації функцій Congestion Avoidance введено керуючі змінні α_i ($i = \overline{1, M}$), кожна з яких характеризує долю i -го потоку пакетів, що отримали відмову в обслуговуванні, тобто відкинуті з черги.

Відповідно до фізичного змісту задачі управління чергами на змінні $x_{i,j}$ накладаються обмеження виду:

$$x_{i,j} \in \{0,1\}, \quad (i = \overline{1, M}, j = \overline{1, N}), \quad (1)$$

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

Виконання умов збереження потоку (2) гарантує, що пакети i -го потоку будуть направлені лише в одну з черг інтерфейсу.

На змінні b_j також накладається ряд обмежень

$$0 \leq b_j, \quad \sum_{j=1}^N b_j \leq b \quad (3)$$

для коректного розподілу ПЗ інтерфейсу (b) між окремими чергами.

Для забезпечення керованості процесом запобігання перевантаження інтерфейсу (Congestion Avoidance) необхідно виконати умови:

$$\sum_{i=1}^M \alpha_i (1 - \alpha_i) x_{i,j} < b_j, \quad (j = \overline{1, N}). \quad (4)$$

Згідно з фізичним змістом α_i , на них накладаються обмеження виду:

$$0 \leq \alpha_i \leq 1. \quad (5)$$

В умовах стохастичного та нестационарного характеру процесів надходження та обслуговування пакетів на інтерфейсі маршрутизатора виконання

умов (4) не є достатнім для запобігання перевантаження буфера черги за її довжиною. Тому для кожної j -ї черги позначимо через \bar{n}_j та n_j^{\max} ($j = \overline{1, N}$) її точну довжину (в пакетах) та максимальну ємність. Тоді умови керованості (4) доповнюються умовами запобігання перевантаження черг за їх довжиною:

$$\bar{n}_j \leq n_j^{\max}, (j = \overline{1, N}), \quad (6)$$

де значення \bar{n}_j залежать від статистичних характеристик потоку, обраної дисципліни обслуговування пакетів та виділеної для даної черги пропускну здатності інтерфейсу. У дисертаційній роботі наведені варіанти розрахункових формул оцінки \bar{n}_j в залежності від обраної системи масового обслуговування, що використовувалась для моделювання роботи інтерфейсу: M/M/1, M/D/1, M/M/1/N_{max}, fBM/M/1/N_{max}.

Умови (4) та (6) пов'язують між собою всі три типи керуючих змінних ($x_{i,j}$, b_j та α_i), що надають погоджений характер рішень основних інтерфейсних задач: Congestion Management, Resource Allocation та Congestion Avoidance. Розвиваючи та доповнюючи ідеї концепції Traffic Engineering Queues, що регламентує питання забезпечення збалансованого завантаження черг, в структуру моделі введено ряд додаткових умов-обмежень

$$k_j^u \cdot \bar{n}_j \leq \beta \cdot n_j^{\max}, (j = \overline{1, N}), \quad (7)$$

$$0 \leq \beta \leq 1, \quad (8)$$

де β – верхня динамічно керована межа завантаженості черг за їх довжиною на інтерфейсі маршрутизатора. Фізичний сенс умов (7) полягає в тому, щоб черги, створювані на інтерфейсі, завантажувалися збалансовано з врахуванням їх максимальної ємності та класу. При цьому, чим вище клас черги (k_j^u), тим меншу довжину вона повинна мати за результатами балансування.

У дисертації погоджений розрахунок керуючих змінних $x_{i,j}$, b_j , α_i та β забезпечується також на підставі мінімізації цільової функції виду:

$$F = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N h_{i,j}^x \cdot x_{i,j} + \sum_{j=1}^N h_j^b \cdot b_j + \sum_{i=1}^M h_i^\alpha \cdot \alpha_i + h^\beta \cdot \beta, \quad (9)$$

де $h_{i,j}^x$ – умовна вартість (метрика) обслуговування пакетів i -го потоку за допомогою j -ї черги; h_j^b – умовна вартість виділення одиниці пропускну здатності інтерфейсу пакетам з j -ї черги; h_i^α – умовна вартість відмов в обслугову-

ванні пакетів i -го потоку; h^β – умовна вартість реалізації процесу балансування довжин черг на інтерфейсі маршрутизатора.

Важливо зазначити, що критерієм направлення пакету того чи іншого потоку у визначену чергу є максимальне співпадіння їх класів k_i^p та k_j^q . Тоді в рамках вдосконаленої моделі (1)-(9) пропонується, щоб метрика, яка відповідає за агрегування потоків, розраховувалась відповідно до формули:

$$h_{i,j}^x = w_x^b (k_i^p - k_j^q)^2 + 1, \quad (i = \overline{1, M}, j = \overline{1, N}). \quad (10)$$

Метрика $h_{i,j}^x$ є додатною величиною та напряму залежить від квадрату «відстані» між класами окремих потоків та черг. За допомогою додатного параметру w_x^b можливо регулювати вплив на кінцеве числове значення цільової функції (9) її першого доданка. Оптимізаційна задача з критерієм (9) і обмеженнями (1)-(8) відноситься до підкласу задач змішаного цілочисельного нелінійного програмування (Mixed Integer Nonlinear Programming, MINLP). З метою зниження обчислювальної складності отриманих рішень з управління чергами з використанням запропонованої моделі (1)-(10) у роботі також була запропонована методика зведення задачі цілочисельної оптимізації до задачі нелінійного програмування.

У роботі проводився аналіз процесу управління чергами на інтерфейсі маршрутизатора з використанням запропонованої моделі (1)-(12). В ході дослідження встановлено, що на число черг, які в ході оптимальної агрегації потоків не використовувалися, впливало ряд факторів, серед яких загальне число потоків пакетів, кількість черг, організованих на інтерфейсі, та закон розподілу між ними (потоками і чергами) класів обслуговування. У роботі використовувалось два закони розподілу класів між потоками: рівномірний і зрізаний нормальний закони. Перший – характерний для випадку, коли на маршрутизаторі мультисервісної мережі ймовірності появи пакетів того чи іншого класу приблизно однакові. Зрізаний нормальний закон використовувався, якщо класи потоків приймали лише обмежений набір значень, і був справедливий для випадку, коли в мережі превалює певна множина класів потоків. При цьому потужність цієї множини задавалася опосередковано через дисперсією розподілу σ^2 .

При розподілі класів обслуговування між потоками оцінювався вплив співвідношення числа потоків і черг (M/N) на відсоток незадіяних черг в ході оптимальної агрегації потоків в рамках запропонованої моделі:

$$P_{\%} = \frac{N_{H3}}{N} \cdot 100\%, \quad (11)$$

де $N_{нз}$ – число незадіяних черг, що отримується в результаті розв’язання задачі управління чергами з оптимальною агрегацією потоків.

В умовах прийняття гіпотези про рівномірний розподіл класів обслуговування потоків застосування моделі (1)-(10) дозволило таким чином агрегувати потоки, щоб зменшити число задіяних черг, а відповідно і час на їх обробку у середньому від 5-7% до 20-25% (рис.1 а). За умов прийняття гіпотези про рівномірний розподіл класів обслуговування потоків, тобто коли на інтерфейсі спостерігається перевага пакетів одних класів над іншими, то застосування моделі (1)-(10) дозволило таким чином агрегувати потоки за чергами без зниження рівня диференціації якості обслуговування в мережі в цілому, що число задіяних черг і час на їх обробку зменшились в середньому від 12-15% до 30-35% при $\sigma^2 = 0,3$; від 8-12% до 28-32% при $\sigma^2 = 1$; від 7-10% до 25-30% при $\sigma^2 = 5$ (рис.1 б). При подальшому зростанні дисперсії розподілу отримані результати все ближче відповідали рішенням, отриманим при використанні рівномірного закону розподілу класів обслуговування між потоками.

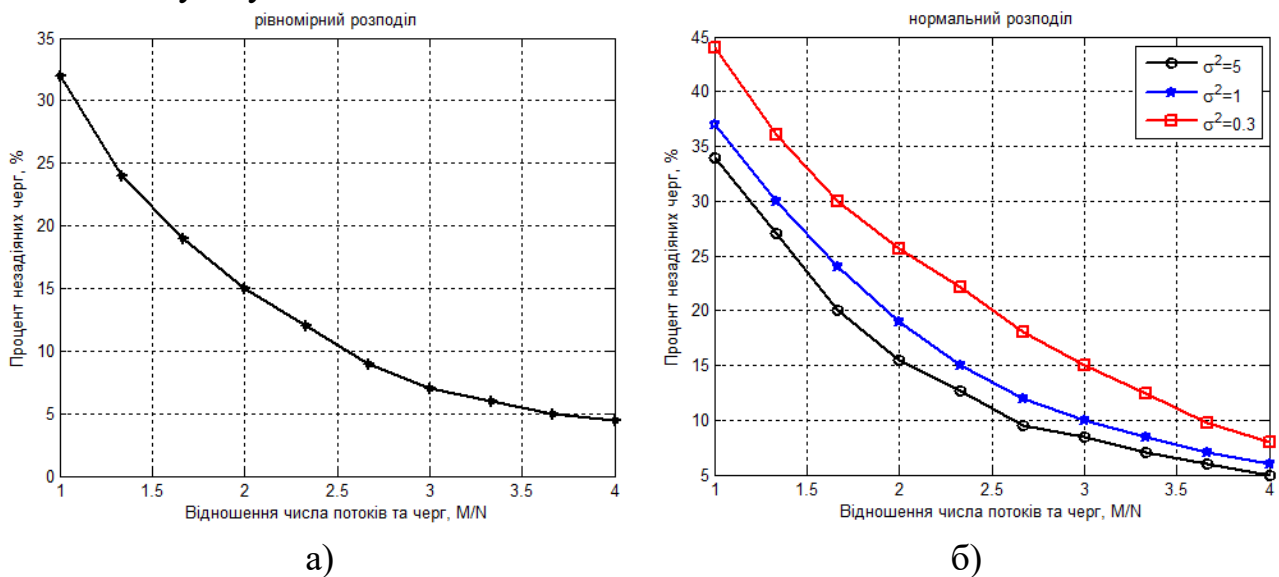


Рис.1. Результати розрахунку відсотка незадіяних черг в ході оптимального агрегування потоків в рамках запропонованої моделі

У третьому розділі отримала подальший розвиток модель управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів активних мереж. Технологія активних мереж (Active Network, AN) створена для більшої гнучкості та адаптованості процесів управління мережним ресурсом та надання послуг. AN складається з активних вузлів (AB). Архітектуру такого вузла утворюють K паралельно функціонуючих активних процесора (АП), які проводять аналіз інформації APCI (Active Processing Control Information) в заголовку кожного пакета, що містить ідентифікатор функції та дескриптор. Ідентифікатор визначає функцію обробки,

а дескриптор вказує на параметри стану активного вузла, які повинні використовуватися в процесі обробки. До складу функцій, які виконуються на активних вузлах, можуть входити буферизація пакетів, управління пропускнуою здатністю вихідних інтерфейсів відповідно до їх завантаження, додаткове стиснення даних до передачі їх за перевантаженою ділянкою АН, шифрування з метою підвищення рівня безпеки переданих даних і т.ін.

Активні процесори можуть бути як однорідними, реалізуючи одну і ту ж функцію обробки пакетів на активному вузлі, так і різнорідними, коли за забезпечення виконання тієї чи іншої обробної функції відповідає деяка обмежена множина активних процесорів. Тоді з метою математичного опису постановки і розв'язання задачі управління чергами на вузлах активної мережі, розширюючи зміст виразів (1), вводяться керуючі змінні

$$x_{i,j}^k \in \{0;1\} \quad (i = \overline{1,M}, j = \overline{1,N}, k = \overline{1,K}), \quad (12)$$

кожна з яких характеризує долю i -го потоку пакетів, який буде направлено для обслуговування в j -ту чергу через k -й АП. Зважаючи на наявність в структурі активного вузла множини АП, умови збереження потоку на інтерфейсі маршрутизатора (2) також дещо модифікуються:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^N x_{i,j}^k = 1, \quad (i = \overline{1,M}). \quad (13)$$

гарантуючи, що пакети кожного i -го потоку будуть направлені лише в одну чергу і лише за допомогою одного активного процесору.

Для забезпечення успішного розв'язання задачі Congestion Avoidance умови (4) модифікуються до вигляду

$$\sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^K a_i (1 - \alpha_i) x_{i,j}^k < b_j, \quad (j = \overline{1,N}). \quad (14)$$

Умови (3), (5) (6)-(8) та (10) не змінюють своєї форми та змісту, але при цьому коефіцієнт використання кожної j -ї черги розраховувався як

$$\rho_j = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^K a_i (1 - \alpha_i) x_{i,j}^k}{b_j}. \quad (15)$$

Важливим доповненням моделі управління чергами на активному вузлі є умова запобігання перевантаження активних процесорів за їх продуктивністю

$$\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N a_i (1 - \alpha_i) x_{i,j}^k \leq c_k, \quad (k = \overline{1, K}). \quad (16)$$

де c_k – продуктивність k -го АП (1/с).

Узгоджений розрахунок керуючих змінних було забезпечено в ході розв'язання оптимізаційної задачі, пов'язаної з мінімізацією цільової функції

$$F = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K h_{i,j}^k \cdot x_{i,j}^k + \sum_{j=1}^N h_j^b \cdot b_j + \sum_{i=1}^M h_i^\alpha \cdot \alpha_i + h^\beta \cdot \beta, \quad (17)$$

в якій $h_{i,j}^k$ – умовна вартість обслуговування пакетів i -го потоку за допомогою k -го активного процесора та j -ї черги інтерфейсу активного вузла.

Новизна моделі (12)-(17), (3), (5) (7) та (10) полягає в тому, що в ході обслуговування пакетів враховуються не тільки кількість і параметри потоків і черг, а й характеристики активних процесорів (тип, завантаженість та продуктивність), що входять в архітектуру маршрутизатора активної мережі (рис.2).

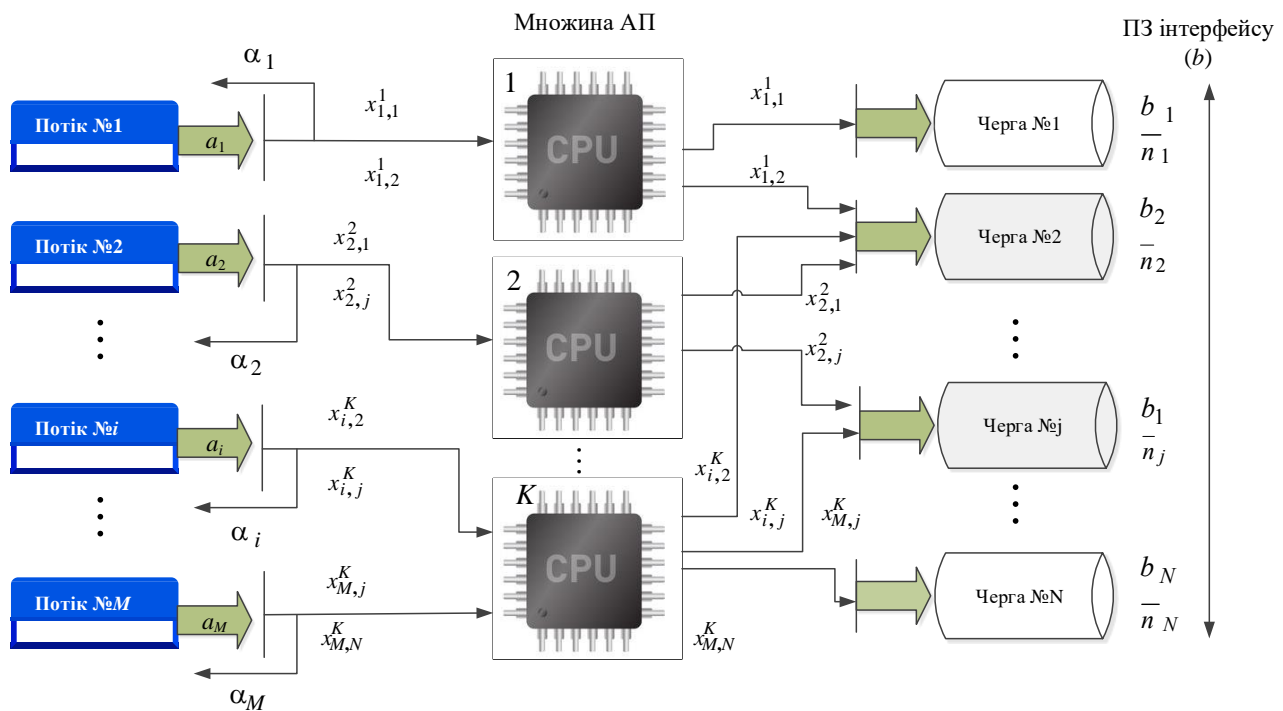


Рис.2. Функціональна архітектура активного вузла

Реалізація запропонованої моделі дозволила забезпечити більш ефективне використання буферного й обчислювального ресурсу маршрутизатора активних мереж. У роботі також шляхом доповнення моделі (12)-(17), (3), (5) (7) та (10) запропоновано рішення щодо математичного опису задачі управління чергами на інтерфейсі активного вузла, в якому організована конвеєрна обробка пакетів активними процесорами.

У четвертому розділі удосконалено метод управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів транспортних телекомунікаційних мереж. Новизна

методу полягає в тому, що за його допомогою оптимізується робота інтерфейсу в ході узгодженого розв'язування задач щодо агрегування потоків, розподілу пакетів по чергах і виділення чергам необхідної пропускної здатності інтерфейсу, а також задач залучення та контролю використання активних процесорів маршрутизатора. Метод включає в себе наступні основні етапи:

1. Моніторинг та аналіз наступних вихідних даних:

- параметрів інтерфейсу: його типу та номінальної пропускної здатності (b), кількості налаштованих черг (N);

- характеристик потоків, що відповідно до змісту маршрутної таблиці маршрутизатора надходять на інтерфейс, що розглядається: загальне число потоків (M), характеристики кожного з потоків – середня інтенсивність a_i , довжини пакету, значення пріоритету, IP-адрес, MAC-адрес та номерів TCP/UDP-портів відправника/отримувача та ін.;

- параметрів активних процесорів, якщо маршрутизатор є активним вузлом: загальної кількості (K) та типів активних процесорів, їх продуктивності (c_k , $k = \overline{1, K}$).

2. Виходячи з аналізу параметрів активних процесорів маршрутизатора, інтерфейсу та характеристик потоків, що на нього надходять, відбувається розрахунок класів черг k_j^u ($j = \overline{1, N}$) та потоків k_i^u ($i = \overline{1, M}$) відповідно.

3. Формування метрик використання ресурсів активних процесорів та інтерфейсу шляхом розрахунку величин h_j^b , h_i^α , h^β , h_k^c та $h_{i,j}^x$ відповідно до (10).

4. Аналіз наявності в заголовку кожного пакету інформації управління APCI. При виявленні APCI здійснюється аналіз її змісту: ідентифікатора функції та дескриптора, визначається тип (множина типів, ланцюг) активних процесорів, що мають використовуватися в ході обробки пакета на маршрутизаторі – активному вузлі.

5. Якщо пакет не містить інформації APCI, то здійснюється розрахунок керуючих змінних $x_{i,j}$, b_j , α_i та β шляхом мінімізації виразу (9) при наявності обмежень (1)-(8).

6. Якщо пакет містить інформацію APCI, то здійснюється розрахунок керуючих змінних $x_{i,j}^k$, b_j , α_i та β шляхом мінімізації виразу (17) при наявності обмежень (12)-(16), (3), (5) (7).

7. Визначення номерів та кількості (N_{H3}) незадіяних черг для зменшення часу обробки пакетів планувальником (диспетчером) черг.

8. Забезпечення функціонування інтерфейсу та активних процесорів за значеннями розрахованих керуючих змінних. Після закінчення таймеру дії поточних керуючих налаштувань здійснюється перехід до етапу 1.

В ході досліджень було організовано лабораторний експеримент на мережному обладнанні компанії Cisco Systems лабораторії розподілу інформації кафедри телекомунікаційних систем ХНУРЕ. Результати експериментального дослідження запропонованих в дисертаційній роботі наукових результатів в цілому підтвердили їх адекватність та ефективність з точки зору практичної реалізації. В ході проведеного дослідження запропонованого методу, що ґрунтувався на вдосконалених в роботі моделях і методі управління чергами, встановлено, що їх застосування дозволяє, по-перше, в залежності від співвідношення числа потоків і черг, а також їх класів скоротити кількість підтримуваних черг від 15-18% до 25-33% без зниження рівня диференціації якості обслуговування потоків користувачів, що сприяє скороченню часу на обробку пакетів на інтерфейсі та мінімізації затримки пакетів в мережі в цілому; по-друге, поліпшити якість обслуговування за показниками середньої затримки пакетів від 7-10% до 14-18% або ймовірності втрат пакетів від 11 до 15% в залежності від характеристик потоків пакетів, кількості організованих черг і параметрів інтерфейсу.

ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

В дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково-прикладну задачу, яка полягала в оптимізації процесу управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів на основі забезпечення узгодженого розв'язання задач щодо агрегування потоків, розподілу пакетів між чергами та виділення чергам пропускнуої здатності інтерфейсу шляхом розробки відповідних математичних моделей і методу для підвищення якості обслуговування в транспортних ТКМ в цілому. За результатами розв'язання наукової задачі зроблено ряд важливих висновків.

1. В роботі показано, що провідна роль в архітектурі забезпечення якості обслуговування в сучасних телекомунікаційних мережах відводиться засобам управління трафіком: протоколам маршрутизації та резервування ресурсів, алгоритмам класифікації та маркування пакетів, механізмам управління чергами та профілювання трафіка. Незважаючи на важливість всіх складових технологій управління трафіком, ключове місце серед них займають механізми управління чергами, тому що саме неефективне управління чергами призводить до значного зниження якості обслуговування, що виявляється в неконтрольованому зростанні затримок і рівня втрат пакетів на інтерфейсах маршрутизаторів ТКМ.

2. Проведено аналіз основних відомих математичних методів і технологічних механізмів управління чергами. На основі виявлених недоліків існуючих рішень сформульовано перелік вимог, які висуваються до перспективних моде-

лей, методів і механізмів управління. До основних з них відносяться такі: врахування потокової структури сучасного мережного трафіку; оптимізаційна постановка та розв'язання задачі управління чергами; підтримка диференціації обслуговування пакетів на інтерфейсах маршрутизаторів ТКМ відповідно до їх QoS-вимог; реалізація динамічних стратегій управління чергами; простота алгоритмічно-програмної та апаратної реалізації; а також забезпечення узгодженого розв'язання взаємозв'язаних інтерфейсних задач.

3. Отримала подальший розвиток потокова модель управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів транспортних телекомунікаційних мереж. Новизна моделі полягає в тому, що в ній в ході управління чергами здійснюється оптимальне агрегування та розподіл потоків на підставі порівняння та мінімізації розбіжності класів потоків і черг, в які вони направляються. Використання моделі дозволило в більшості випадків скоротити число підтримуваних черг на інтерфейсі без зниження рівня диференціації якості обслуговування, що сприяло мінімізації часу на обробку пакетів на інтерфейсі та зниження їх міжкінцевої затримки в мережі в цілому.

4. Отримала подальший розвиток модель управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів активних мереж. Новизна моделі полягає в тому, що в ході обслуговування пакетів враховуються не тільки кількість та параметри потоків і черг, а й характеристики активних процесорів (тип, завантаженість та продуктивність), що входять до архітектури маршрутизатора активної мережі. Реалізація запропонованої моделі дозволила забезпечити більш ефективне використання буферного й обчислювального ресурсу маршрутизатора активних мереж.

5. Удосконалено метод управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів транспортних телекомунікаційних мереж. Новизна методу полягає в тому, що за його допомогою оптимізується робота інтерфейсу в ході узгодженого розв'язування задач щодо агрегування потоків, розподілу пакетів по чергах і виділення чергам необхідної пропускної здатності інтерфейсу, а також задач залучення та контролю використання активних процесорів маршрутизатора.

6. В ході проведеного дослідження запропонованих і вдосконалених в роботі моделей і методу управління чергами встановлено, що їх застосування дозволяє, по-перше, в залежності від співвідношення числа потоків і черг, а також їх класів скоротити кількість підтримуваних черг від 15-18% до 25-33% без зниження рівня диференціації якості обслуговування потоків користувачів, що сприяє скороченню часу на обробку пакетів на інтерфейсі та мінімізації міжкінцевої затримки пакетів в мережі в цілому; по-друге, поліпшити якість обслуговування за показниками середньої затримки пакетів від 7-10% до 14-18% або ймовірності втрат пакетів від 11 до 15% в залежності від характеристик потоків пакетів, кількості організованих черг і параметрів інтерфейсу.

7. В ході досліджень було проведено лабораторний експеримент на мережному обладнанні компанії Cisco Systems лабораторії телекомунікаційних систем ХНУРЕ. Результати експериментального дослідження запропонованих в дисертаційній роботі наукових результатів в цілому підтвердили їх адекватність та ефективність з точки зору практичної реалізації. Наукові та практичні результати дисертаційних досліджень також використані при модернізації та розвитку телекомунікаційної системи ТОВ «Сигма СОФТВЕА» і в навчальному процесі ХНУРЕ в дисципліні «Системи комутації та розподілу інформації, частина 2».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Лемешко А.В. Управление очередями на узлах активной сети / А.В. Лемешко, М. Ватти, А.В. Симоненко // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2007. – Вып. 151. – С. 92-97.
2. Симоненко А.В. Модель динамического управления очередями и пропускной способностью канала связи на маршрутизаторах мультисервисной сети / А.В. Симоненко, Ахмад Хайлан, Али Али // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. 2008. – Вып. 155. – С. 164-168.
3. Лемешко А.В. Поточковая модель управления очередями с динамическим распределением пропускной способности исходящего канала связи / А.В. Лемешко, А.В. Симоненко, Махмуд Ватти // Наукові записки УНДІЗ. – 2008. – №3 (5). – С.34-39.
4. Лемешко А.В. Математическая модель динамического управления канальным и буферным ресурсом на узлах телекоммуникационной сети / А.В. Лемешко, А.В. Симоненко // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб., 2009. – Вып. 156. – С. 36-41.
5. Лемешко А.В. Поточковая модель динамической балансировки очередей на узлах телекоммуникационной сети / А.В. Лемешко, А.В. Симоненко, С.И. Сивашенко // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб., 2009. – Вып. 159. – С. 46-49.
6. Али С. Али. Поточковая модель динамической балансировки очередей в MPLS-сети с поддержкой Traffic Engineering Queues: [Электронный ресурс] / Али С. Али, А.В. Симоненко // Проблемы телекоммуникаций. – 2010. – № 1 (1). – С. 59-67. – Режим доступа до журн.: http://pt.journal.kh.ua/2010/1/1/101_ali_balancing.pdf.
7. Семеняка М.В. Разработка и исследование метода динамической балансировки очередей на маршрутизаторах мультисервисной телекоммуникационной сети: [Электронный ресурс] / М.В. Семеняка, А.В. Симоненко, Али С. Али

// Проблемы телекоммуникаций. – 2012. – № 3(8). – С. 66-78. – Режим доступа до журн.: http://pt.journal.kh.ua/2012/3/1/123_semenyaka_balancing.pdf.

8. Семеняка М.В. Экспериментальное исследование метода динамической балансировки очередей на маршрутизаторах мультисервисной телекоммуникационной сети / М.В. Семеняка, А.В. Симоненко // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. – Ростов-на-Дону: ПЦ "Университет" СКФ МТУСИ, 2013. – С.220-223.

9. Вавенко Т.В. Поточковая модель маршрутизации с балансировкой нагрузки по длине очереди в программно-конфигурируемых сетях / Т.В. Вавенко, В.Л. Стерин, А.В. Симоненко // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 4 (86). – С. 38-45.

10. Лемешко А.В. Модель активного управления очередями на маршрутизаторах телекоммуникационной сети / А.В. Лемешко, М.В. Семеняка, А.В. Симоненко // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. – Ростов-на-Дону: ПЦ "Университет" СКФ МТУСИ'2015. – Ч.1 – С. 244-248.

11. Симоненко А.В. Математическая модель управления очередями на маршрутизаторах телекоммуникационной сети на основе оптимального агрегирования потоков и распределения пакетов по очередям [Электронный ресурс] / А.В. Симоненко, Д.В. Андрушко // Проблемы телекоммуникаций. – 2015. – № 1 (16). – С. 94 - 102. – Режим доступа до журн.: http://pt.journal.kh.ua/2015/1/1/151_simonenko_queue.pdf.

12. Лемешко А.В. Математическая модель управления сетевыми ресурсами с адаптивным ограничением абонентского трафика / А.В. Лемешко, Ю.Н. Добрышкин, А.В. Симоненко // Перспективные технологии в средствах передачи информации: VII междунар. науч.-техн. конф., 10-12 октября 2007 г. – Владимир: РОСТ, 2007. – С. 61-64.

13. Симоненко О.В. Модель управління чергами на вузлах активної мережі / О.В. Симоненко, М. Ватті // Сучасні телекомунікаційні та інформаційні технології: 2-й наук.-практ. семінар молодих науковців та студентства., 12-14 грудня 2007 р. – Київ.: Український науково-дослідний інститут зв'язку, 2007. – С.73-76.

14. Добрышкин Ю.Н. Модель адаптивного ограничения абонентского трафика в мультисервисных сетях / Ю.Н. Добрышкин, А.В. Симоненко // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: четырнадцатая Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов, 28-29 февраля 2008 г.: тезисы докл. – М.: Издательский дом Московского Энергетического института, 2008. – Т.1 – С. 129-130.

15. Добрышкин Ю.Н., Модель согласованного управления трафиком и буферным ресурсом в телекоммуникационной сети / Ю.Н. Добрышкин, А.В. Си-

моненко // Проблеми телекомунікацій: друга Міжнар. наук.-техн. конф., 20-23 травня 2008 р. : збірник тез. – К.: НТУУ "КПІ", 2008. – С.207-208.

16. Симоненко А.В. Математическая модель управления очередями на транзитных узлах активной сети / А.В. Симоненко, Махмуд Ватти // Радиоэлектроника и молодежь в XII веке: 12-й Междунар. молодежный форум, 1-3 апреля 2008 г.: сб. материалов форума – Х.: ХНУРЭ, 2008. – Ч.1 – С.161.

17. Лемешко А.В. Модели управления очередями с динамическим распределением пропускной способности исходящего канала связи / А.В. Лемешко, А.В. Симоненко, М. Ватти // Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития: 3-й Междунар. радиоэлектронный форум МРФ-2008, 22-24 октября 2008 г.: сб. науч. трудов – Х.: АНПРЭ, ХНУРЭ, 2008. – Т. II – С. II-69–II-72.

18. Симоненко А.В. Модель управления буферным и канальным ресурсом мультисервисной сети / А.В. Симоненко, Ахмад Хайлан, Али Али // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: 13-й Междунар. молодежный форум, 30 марта-1 апреля 2009 г.: сб. материалов форума – Х.: ХНУРЭ, 2009. – Ч.1 – С.161.

19. Лемешко А.В. Математическая модель динамического управления канальным и буферным ресурсом на узлах телекоммуникационной сети / А.В. Лемешко, А.В. Симоненко // Новітні технології – для захисту повітряного простору: п'ята наук. конф. Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 15-16 квітня 2009 р.: тези доповідей – Х.: ХУ ПС, 2009. – С.98-99.

20. Симоненко А.В. Поточкова модель внутріузлового управління сетевими ресурсами в мультисервисной телекоммуникационной системе / А.В. Симоненко, Ахмад М. Хайлан, Али С. Али // Перспективные технологии в средствах передачи информации: VIII Междунар. науч.-техн. конф., 21-22 мая 2009 г.: материалы конф. – Владимир: Владим. гос. ун-т., 2009. – Т. 2. – С. 94-97.

21. Алі С. Алі. Поточкова модель динамічного балансування завантаженості черг на вузлах MPLS-мережі / Алі С. Алі, О.В. Симоненко // Сучасні проблеми телекомунікацій – 2010: наук.-практ. конф., 28-30 жовтня 2010 р.: матеріали конф. - Львів: НУ "Львівська політехніка", 2010. - С. 40-43.

22. Женжера С.В. Математическая модель с динамическим управлением сетевыми ресурсами на узлах телекоммуникационной сети / С.В. Женжера, А.В. Симоненко // Новітні технології – для захисту повітряного простору: шоста наук. конф. Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 14-15 квітня 2010 р.: тези доповідей – Х.: ХУ ПС, 2010. – С.116-117.

23. Симоненко А.В. Поточкова модель динамической балансировки загруженности очередей на узлах IP-сети / А.В. Симоненко, Али С. Али, А.С. Билык, // Компьютерное моделирование в наукоемких технологиях - КМНТ-2010: науч.-техн. конф. с междунар. участием, 18-21 мая 2010 г.: сб. науч. трудов – Х.: ХНУ имени В.Н. Каразина, 2010. – Ч. 2. – С.231-234.

24. Лемешко А.В. Математическая модель динамической балансировки загруженности очередей на узлах телекоммуникационной сети / А.В. Лемешко, А.В. Симоненко // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: V міжнар. наук.-техн. конф., 22-24 вересня 2010 р. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2010. – С.111-112.

25. Симоненко А.В. Динамическая балансировка загруженности очередей на узлах телекоммуникационной сети / А.В. Симоненко, А.Г. Беленков // Сучасні телекомунікаційні та інформаційні технології: наук.-практ. семінар молодих науковців, травень-червень 2010 р.: наук.-виробн. збірник – Київ.: Український науково-дослідний інститут зв'язку, 2010. – №1 – С.16-18.

26. Лемешко А.В. Поточковая модель динамической балансировки очередей в MPLS-сети с поддержкой Traffic Engineering Queues / А.В. Лемешко, А.В. Симоненко // Новітні технології – для захисту повітряного простору: сьома наук. конф. Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 13-14 квітня 2011 р.: тези доповідей – Х.: ХУ ПС, 2011. – С.158-159.

27. Симоненко А.В. Поточковая модель динамической балансировки загруженности очередей в MPLS-сети с поддержкой Traffic Engineering Queues // Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития: 4-й Международный радиоэлектронный форум МРФ-2011, 18-21 октября 2011 г.: сб. науч. трудов – Х.: АНПРЭ, ХНУРЭ. 2011. – Т. II – С. II-76–II-80.

28. Женжера С.В. Управление очередями на узлах телекоммуникационной сети / С.В. Женжера, А.В. Симоненко // Новітні технології – для захисту повітряного простору: восьма наук. конф. Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 18-19 квітня 2012 р.: тези доповідей – Х.: ХУ ПС, 2012. – С.195-196.

29. Семеняка М.В. Исследование концепции иерархических очередей для решения задач управления перегрузками в телекоммуникационной сети / М.В. Семеняка, А.В. Симоненко // Сучасні інформаційно-комунікаційні технології (COMINFO'2012 – Livadia): VIII міжнар. наук.-техн. конф., 1-5 жовтня 2012 р.: зб. тез – К: ДУІКТ, 2012. – С. 68-70.

30. Lemeshko O. Researching and designing of the dynamic adaptive queue balancing method on telecommunication network routers / O. Lemeshko, M. Semenyaka, O. Simonenko // The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2013): XII international conference, 19-23 Febr. 2013. – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2013. – P. 204-207.

31. Женжера С.В. Динамическая балансировка очередей в MPLS-сети с поддержкой Traffic Engineering Queues / С.В. Женжера, А.В. Симоненко // Новітні технології – для захисту повітряного простору: дев'ята наук. конф.

Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 17-18 квітня 2013 р.: тези доповідей – Х.: ХУ ПС, 2013. – С.199.

32. Семеняка М.В. Двухуровневая иерархически-координационная модель распределения трафика пользователей на узлах телекоммуникационной сети / М.В. Семеняка, А.В. Симоненко // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: 23-я междунар. Крымская конф., 8-13 сентября 2013 г.: материалы конф. – Севастополь: СевНТУ, 2013. – С. 527-528.

33. Lemeshko O. A queue management model on router of active network / O. Lemeshko, Ali Salem. Ali, O. Simonenko // The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2015): XIII international conference, 24-27 Febr. 2015: proceedings – Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2015. – P. 419-421.

34. Патент на корисну модель 47461 Україна, МПК H04L12/56. Спосіб управління трафіком в мультисервісній телекомунікаційній мережі / О.В. Лемешко, Ю.М. Добришкін, О.В. Симоненко, К.С. Васюта; власник Харківський університет Повітряних Сил ім. Івана Кожедуба. – № u 2009 05821; Заявл. 09.06.2009, Опубл. 10.02.2010. Бюл. №3.

35. Патент на корисну модель 70088 Україна, МПК G06G 3/00 (2012.01). Спосіб управління чергами на маршрутизаторах мультисервісної телекомунікаційної мережі / О.В. Лемешко, Алі Салем Алі, М.В. Семеняка, О.В. Симоненко; власник Харківський національний університет радіоелектроніки. – № u 2011 13675 Заявл. 21.11.2011, Опубл. 25.05.2012. Бюл. №10.

АНОТАЦІЯ

Симоненко Олександр Вікторович. Поточкові моделі та методи управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів транспортних телекомунікаційних мереж. – Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі. Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2016.

У ході розв'язання поставленої наукової задачі у дисертаційній роботі отримані такі нові наукові результати. Отримала подальший розвиток потокова модель управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів транспортних ТКМ, новизна якої полягає в тому, що в ході управління чергами здійснюється оптимальне агрегування та розподіл потоків на підставі порівняння та мінімізації розбіжності класів потоків і черг, в які вони направляються, що дозволило в більшості випадків скоротити число підтримуваних черг на інтерфейсі без зниження рівня диференціації якості обслуговування. Отримала подальший розвиток модель управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів активних ме-

реж, новизна якої полягає в тому, що в ході обслуговування пакетів враховуються характеристики активних процесорів (тип, завантаженість та продуктивність), що дозволило забезпечити більш ефективне використання буферного й обчислювального ресурсу маршрутизатора активних мереж. Удосконалено метод управління чергами на інтерфейсах маршрутизаторів транспортних ТКМ, новизна якого полягає в тому, що з його допомогою оптимізується робота інтерфейсу в ході узгодженого розв'язання задач щодо агрегування потоків, розподілу пакетів по чергах і виділення чергам необхідної пропускної здатності інтерфейсу, а також задач по залученню та контролю використання активних процесорів маршрутизатора.

Ключові слова: мережа, черга, управління, інтерфейс, пакет, потік, модель, метод, маршрутизатор, оптимальність, пропускна здатність.

АННОТАЦІЯ

Симоненко Александр Викторович. Потокковые модели и методы управления очередями на интерфейсах маршрутизаторов транспортных телекоммуникационных сетей. – Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.02 – телекоммуникационные системы и сети. Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2016.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научной задачи, связанной с оптимизацией процесса управления очередями на интерфейсе маршрутизаторов на основе обеспечения согласованного решения задач по агрегированию потоков, распределения пакетов между очередями и выделения очередям пропускной способности интерфейса путем разработки соответствующих математических моделей и методов для повышения качества обслуживания в транспортных телекоммуникационных сетях (ТКС) в целом.

Проведен анализ основных известных математических методов и технологических механизмов управления очередями. На основе выявленных недостатков существующих решений сформулирован перечень требований, которые предъявляются к перспективным моделям, методам и механизмам по управлению. К основным из них относятся учет потоковой структуры современного сетевого трафика; оптимизационная постановка и решение задачи управления очередями; поддержка дифференциации обслуживания пакетов на интерфейсах маршрутизаторов ТКС в соответствии с их QoS-требованиями; реализация динамических стратегий управления очередями; простота алгоритмически-программной и аппаратной реализации; а также обеспечение согласованного решения взаимосвязанных интерфейсных задач (классификация и маркировка пакетов; создание и

настройка системы очередей на интерфейсе; агрегирование потоков и распределение пакетов по очередям интерфейса с учетом параметров передаваемых потоков, требований к качеству обслуживания, характеристик создаваемых очередей и интерфейса в целом; определение порядка обслуживания очередей; распределение пропускной способности интерфейса между отдельными очередями; превентивное (заблаговременное) ограничение длины очереди).

В ходе решения поставленной научной задачи в диссертационной работе получены следующие новые научные результаты. Получила дальнейшее развитие потоковая модель управления очередями на интерфейсах маршрутизаторов транспортных телекоммуникационных сетей. Новизна модели заключается в том, что в ней в ходе управления очередями осуществляется оптимальное агрегирование и распределение потоков на основании сравнения и минимизации расхождения классов потоков и очередей, в которые они направляются. Использование модели позволило в большинстве случаев сократить число поддерживаемых очередей на интерфейсе без снижения уровня дифференциации качества обслуживания, что способствовало минимизации времени на обработку пакетов на интерфейсе и снижению их межконцевой задержки в сети в целом.

Получила дальнейшее развитие модель управления очередями на интерфейсах маршрутизаторов активных сетей. Новизна модели заключается в том, что в ходе обслуживания пакетов учитываются не только количество и параметры потоков и очередей, но и характеристики активных процессоров (тип, загруженность и производительность), входящих в архитектуру маршрутизатора активной сети. Реализация предложенной модели позволила обеспечить более эффективное использование буферного и вычислительного ресурса маршрутизатора активных сетей.

Усовершенствован метод управления очередями на интерфейсах маршрутизаторов транспортных телекоммуникационных сетей. Новизна метода заключается в том, что с его помощью оптимизируется работа интерфейса в ходе согласованного решения задач по агрегированию потоков, распределению пакетов по очередям и выделения очередям необходимой пропускной способности интерфейса, а также задач по задействованию и контролю использования активных процессоров маршрутизатора.

В ходе проведенного исследования предложенных и усовершенствованных в работе моделей и метода управления очередями установлено, что их применение позволяет, во-первых, в зависимости от соотношения числа потоков и очередей, а также их классов сократить количество поддерживаемых очередей от 15-18% до 25-33% без снижения уровня дифференциации качества обслуживания потоков пользователей, что способствует сокращению времени на обработку пакетов на интерфейсе и минимизации межконцевой задержки пакетов в

сети в целом; во-вторых, улучшить качество обслуживания по показателям средней задержки пакетов от 7-10% до 14-18% или вероятности потерь пакетов от 11 до 15% в зависимости от характеристик потоков пакетов, числа организованных очередей и параметров интерфейса.

Ключевые слова: сеть, очередь, управление, интерфейс, пакет, поток, модель, метод, маршрутизатор, оптимальность, пропускная способность.

ABSTRACT

Simonenko O.V. Flow-based queue management models and methods on router interfaces of transport telecommunication networks. – Manuscript. Dissertation for the candidate of technical sciences degree in specialty 05.12.02 – telecommunication systems and network. – Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, 2016.

In solving the scientific problem in dissertation the following new scientific results obtained. Further developed the flow-based queue management model at the router interfaces of transport telecommunication networks (TCN), the novelty of which is in the fact that in queue management realized optimal aggregation and flows allocation by comparison and minimization differences of flow classes and queues in which they are sent, allowing in most cases, reduce the number of supported queues on the interface without reducing quality of service differentiation. Further developed the queue management model of router interfaces in active networks which novelty is that during packet service accounted characteristics of active processors (type, utilization, and performance), allowing the more efficient use of buffer and computational resources of active network routers. Improved the method of queue management on router interfaces of transport TCN, which novelty is that the interface functioning optimized during the consistent solution of problems regarding flow aggregation, packets distribution in queues and allocation of all necessary interface throughput to queues, as well as problems in participation and control of use the router active processors.

Keywords: network, queue, management, interface, packet, flow, model, method, router, optimality, bandwidth.

Підп. до друку 24.03.16.
Умов. друк. арк. 1,4

Формат 60x84 1/8 Спосіб друку – ризографія
Тираж 100 прим. Зам. № 1/25.
Ціна договірна.

ФОП Андреев К.В.
Харків, вул. Серпова, 4