

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Вавенко Тетяна Василівна

УДК 621.391

**МОДЕЛІ І МЕТОД БАГАТОШЛЯХОВОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ
З БАЛАНСУВАННЯМ НАВАНТАЖЕННЯ В ПРОГРАМНО-
КОНФІГУРОВАНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖАХ**

05.12.02 – Телекомунікаційні системи та мережі

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків - 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі телекомунікаційних систем Харківського національного університету 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
Зайцев Дмитро Анатолійович,
Міжнародний гуманітарний університет Міністерства освіти
і науки України,
професор кафедри комп'ютерної інженерії;

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Усачова Ольга Анатоліївна,
Харківський університет Повітряних Сил імені Івана
Кожедуба Міністерства оборони України,
старший науковий співробітник Наукового центру
Повітряних Сил

Захист відбудеться «12» лютого 2014 р. о 15:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.09 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою:

Україна, 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою:

Україна, 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

Автореферат розісланий «10» січня 2014 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.052.09

Є.В.Дуравкін

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Як показав проведений аналіз, подальший розвиток TCP/IP-мереж пов'язаний з реалізацією ідей, які покладені в основу концепції програмно-конфігурованих телекомунікаційних мереж (ПК-ТКМ, Software Defined Networking, SDN). Враховуючи новизну концепції ПК-ТКМ, її розвиток і впровадження вимагає удосконалення існуючих телекомунікаційних технологій та їх адаптацію під нові умови. І в першу чергу це стосується задач маршрутизації, які в ПК-ТКМ вирішуються більш централізовано на спеціальних серверах, які є продуктивнішими, ніж традиційні IP-маршрутизатори. Це дозволяє використовувати більш ефективні і одночасно більш складні з обчислювальної точки зору протоколи маршрутизації. На сьогоднішній день протоколи маршрутизації з метою задоволення зростаючих вимог щодо якості обслуговування (Quality of Service, QoS) свої класичні функції розширюють в напрямку підтримки додаткових можливостей, серед яких балансування навантаження за каналами ТКМ з реалізацією багатошляхової стратегії маршрутизації. Забезпечення балансування навантаження на практиці дозволяє оптимізувати розв'язання задачі маршрутизації і ефективно використовувати ресурси мережі, в результаті чого покращуються значення ключових показників QoS.

Ефективність балансування навантаження при розв'язанні задач маршрутизації в ТКМ в цілому і в ПК-ТКМ зокрема традиційно багато в чому залежить від адекватності математичних моделей і методів, що використовуються при розробці відповідних протоколів багатошляхової маршрутизації. Однак, в результаті дослідження встановлено, що існуючі математичні моделі і методи багатошляхової маршрутизації з балансуванням навантаження не завжди дозволяють забезпечити максимально можливий рівень QoS, а інколи призводять до зациклювання пакетів. Крім того, існуючі моделі і методи не враховують особливостей ПК-ТКМ і не адаптовані під них. Отже, актуальності набуває наукова задача, пов'язана з удосконаленням і розробкою математичних моделей і методів багатошляхової маршрутизації з балансуванням навантаження для програмно-конфігурованих телекомунікаційних мереж.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота пов'язана з реалізацією основних положень «Концепції національної інформаційної політики», «Концепції Національної програми інформатизації», «Концепції конвергенції телефонних мереж і мереж з пакетною комутацією в Україні» та «Основних засад розвитку інформаційного суспільства в Україні на 2007-2015 роки». Результати дисертаційної роботи використані в ході виконання наступних науководослідних робіт: № 235-1 «Методи проектування телекомунікаційних мереж NGN та управління їх ресурсами» (№ ДР 0109U000662), № 261-1 «Методи підвищення продуктивності безпроводових мереж наступного покоління» (№ ДР 0111U002627), в яких автор виступав співвиконавцем. Отримано два патенти на корисну модель

«Спосіб балансування навантаженням в телекомунікаційних мережах з неоднорідною структурою» і «Спосіб маршрутизації з балансуванням навантаження в телекомунікаційних мережах».

Мета дисертаційної роботи полягає у підвищенні якості обслуговування в програмно-конфігурованих телекомунікаційних мережах за показниками продуктивності, середніх затримок, джиттеру шляхом вдосконалення моделей і методів маршрутизації з балансуванням навантаження.

Задачами дослідження є:

- огляд відомих математичних моделей і методів маршрутизації з балансуванням навантаження в телекомунікаційних мережах;
- аналіз стану рішень задач маршрутизації з балансуванням навантаження в програмно-конфігурованих телекомунікаційних мережах;
- розробка поточкових моделей і методу маршрутизації з балансуванням навантаження в програмно-конфігурованих телекомунікаційних мережах;
- оцінка ефективності та розробка рекомендацій щодо практичного використання запропонованих у дисертації рішень.

Об'єктом дослідження є процес маршрутизації з балансуванням навантаження в програмно-конфігурованих телекомунікаційних мережах.

Предметом дослідження є моделі та методи маршрутизації з балансуванням навантаження в програмно-конфігурованих телекомунікаційних мережах.

Методи дослідження. В ході виконання дисертаційної роботи були використані аналітичні та імітаційні методи дослідження. При вдосконаленні та розробці математичних моделей багатошляхової маршрутизації з балансуванням навантаження були використані теорія масового обслуговування, теорія графів, методи оптимізації (лінійного та нелінійного програмування). При моделюванні трафіка в сучасних ТКМ з пакетною комутацією – теорія телетрафіка. В ході перевірки адекватності запропонованих моделей та оцінки ефективності розроблених методів використовувалися методи лабораторного експерименту і математичної статистики.

Наукова новизна одержаних результатів. Під час розв'язання поставленої наукової задачі було отримано такі нові наукові результати:

1. Вдосконалено модель багатошляхової маршрутизації з балансуванням навантаження за критерієм, що пов'язаний з мінімізацією коефіцієнта використання каналів зв'язку в гетерогенній телекомунікаційній мережі з дуплексними та (або) напівдуплексними каналами за рахунок введення додаткової умови-обмеження, виконання якої гарантує усунення ефекту зациклювання пакетів без зниження ефективності балансування й якості обслуговування в цілому.

2. Отримав подальший розвиток метод багатошляхової маршрутизації з балансуванням навантаження за критерієм, пов'язаним з мінімізацією коефіцієнта використання каналів зв'язку телекомунікаційних мереж з неоднорідною

топологією, представлених розділимим графом, який відрізняється від відомих рішень тим, що задача маршрутизації розв'язується не централізовано, а шляхом використання підходу «за підмережами». Запропонований метод дозволяє зменшити вплив коефіцієнтів використання каналів зв'язку, які утворюють максимальний розріз, на кінцеве рішення, покращити ефективність балансування навантаження за всіма каналами телекомунікаційної мережі і підвищити числові значення показників якості обслуговування, в тому числі значення міжкінцевої багатошляхової затримки пакетів в середньому від 7-11% до 24-30% в залежності від ступеня неоднорідності структури телекомунікаційної мережі.

3. Вдосконалено модель багатошляхової маршрутизації в програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі. Новизна моделі полягає в тому, що в ній задача багатошляхової маршрутизації представлена як задача балансування довжин черг на маршрутизаторах телекомунікаційної мережі. Як критерії оптимальності одержуваних рішень до використання обґрунтований мінімум або сумарної, або максимальної довжини черги на мережних вузлах залежно від структурних і функціональних параметрів телекомунікаційної мережі, що дозволило покращити значення міжкінцевої багатошляхової затримки пакетів при перевантаженні каналів зв'язку.

4. Отримала подальший розвиток модель багатошляхової маршрутизації з балансуванням навантаження в програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі. Новизна моделі полягає в тому, що в якості умов балансування виступає рівність нулю контурних затримок пакетів для кожного потоку окремо. Використання запропонованої моделі дозволяє покращити значення міжкінцевої багатошляхової затримки і джиттеру, викликаного реалізацією багатошляхової стратегії маршрутизації при заданих вимогах щодо швидкості передачі та імовірності втрат пакетів.

Практичне значення результатів роботи. Практична цінність отриманих в дисертації результатів полягає в тому, що вони можуть бути покладені в основу відповідних протокольних рішень під час розв'язання задачі багатошляхової маршрутизації з балансуванням навантаження, при розробці перспективних алгоритмів балансування навантаження, при розподілі пропускну здатності каналів зв'язку в програмно-конфігурованій телекомунікаційній мережі. Реалізація на практиці отриманих рішень дозволить покращити основні показники якості обслуговування (міжкінцеву багатошляхову затримку та джиттер). Отримані в дисертаційній роботі результати були використані у навчальному процесі кафедри ТКС ХНУРЕ у лекційному курсі дисципліни «Управління та маршрутизація в ТКС». Крім того, результати дисертаційної роботи використано під час виконання науково-дослідних робіт № 235-1 (№ ДР 0109U000662) та № 261-1 (№ ДР 0111U002627), в яких автор виступав співвиконавцем. Використання результатів дисертаційної роботи підтверджено

відповідними актами впровадження. Отримано два патенти на корисну модель.

Особистий внесок здобувача. Всі основні наукові результати, висвітлені в дисертаційній роботі, здобувач отримав самостійно. Крім того, в роботі [1] автором проведено кількісний порівняльний аналіз розв'язання задач одно- і багатопотокової маршрутизації багатопотокового трафіка в ТКМ; в статті [2] здобувачем проведено аналіз недоліків потокової моделі багатопотокової маршрутизації на основі балансування навантаження за критерієм, що пов'язаний з мінімізацією коефіцієнта максимального використання каналів ТКМ, запропоновано ряд рішень, спрямованих на усунення виявлених недоліків; в статті [3] здобувачем запропонована потокова модель багатопотокової маршрутизації з балансуванням довжин черг (середньої або максимальної) на вузлах ТКМ; в роботі [4] автором запропонована потокова модель багатопотокової маршрутизації з балансуванням довжин черг для ПК-ТКМ; в публікації [5] автором проведено дослідження розв'язання задачі маршрутизації з балансуванням навантаження за критерієм, що пов'язаний з мінімізацією коефіцієнта максимального використання каналів ТКМ; показано, що якість балансування нелінійно залежить від структурних і функціональних параметрів мережі, характеристик трафіка; запропоновано та обґрунтовано до використання модель маршрутизації з балансуванням навантаження за критерієм, який пов'язаний з показниками QoS; в публікації [6] автором запропонована потокова модель маршрутизації за критерієм, пов'язаним з середньою багатопотоковою затримкою пакетів; в роботі [7] автором запропонована потокова модель адаптивної маршрутизації для ПК-ТКМ з балансуванням навантаження за критерієм, виконання якого пов'язане із забезпеченням рівності нулю контурних затримок пакетів для кожного потоку окремо.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідались протягом двадцяти чотирьох науково-технічних конференціях, симпозіумах, форумах та семінарах, у тому числі на XIV, XV, XVI, XVII Міжнародних молодіжних форумах «Радіoeлектроніка та молодь у XXI сторіччі» (м. Харків, ХНУРЕ, 2010-2013); III Міжнародному науково-технічному симпозіумі «Нові технології в телекомунікаціях» (м. Київ, ДУІКТ, 2010); Науково-технічній конференції з міжнародною участю «Комп'ютерне моделювання в наукоємних технологіях» (м. Харків, ХНУ, 2010); IX та X Міжнародних наукових конференціях «Перспективные технологии в средствах передачи информации – ПТСПИ'2011, ПТСПИ'2013» (Росія, м. Володимир, ВолДУ, 2011-2013); II Міжнародній науково-практичній конференції «Технологии информатизации и управления ТІМ – 2011» (Білорусь, м. Гродно, ГрДУ ім. Янки Купали, 2011); VIII Міжнародній науково-практичній конференції студентства та молоді «Світ інформації та телекомунікацій – 2011» (м. Київ, ДУІКТ, 2011); IV Міжнародному радіoeлектронному форумі «Прикладна радіoeлектроніка. Стан та перспективи розвитку (МРФ – 2011)» (м. Харків, ХНУРЕ, 2011); I Міжнародній науково-практичній конференції молодих учених «Інфокомунікації – сучас-

ність та майбутнє» (м. Одеса, ОНАЗ, 2011); V Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми телекомунікацій» (м. Київ, НТУУ КПІ, 2011); VIII Міжнародній молодіжній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій РТ – 2012» (м. Севастополь, СевНТУ, 2012); VIII і IX Наукових конференціях ХУПС ім. Івана Кожедуба «Новітні технології – для захисту повітряного простору» (м. Харків, ХУПС, 2012-2013); XII Всеукраїнській науково-технічній конференції молодих учених, аспірантів та студентів «Стан, досягнення і перспективи інформаційних систем і технологій» (м. Одеса, ОДАХ, 2012); VI Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій» (м. Запоріжжя, ЗНТУ, 2012); VIII Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології (COMINFO'2012 – Livadia)» (м. Київ, ДУІКТ, 2012); XII Міжнародній конференції «The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2013)» (м. Львів, НУ «ЛП», 2013); Міжнародній молодіжній науково-практичній конференції СКФ МТУЗІ «ИНФОКОМ – 2013» (м. Ростов-на-Дону, ПФ МТУЗІ, 2013); XXIII Міжнародній конференції «НВЧ-техніка і телекомунікаційні технології» (КрыМиКо'2013) (м. Севастополь, СевНТУ, 2013); I Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми інфокомунікацій. Наука і технології (PIC S&T-2013)» (м. Харків, ХНУРЕ, 2013); III и IV відкритих наукових семінарах «Проблеми математичного моделювання телекомунікаційних систем» (м. Харків, ХНУРЕ, 2012-2013).

Публікації. За матеріалами дисертації опублікована 31 робота, у тому числі 7 статей, серед яких 4 статті у наукових фахових виданнях України [1–3, 5] та 3 статті у закордонних журналах [4, 6, 7]. Отримано два патенти на корисну модель [8, 9]. Матеріали дисертації опубліковані в двадцяти двох тезах доповідей на міжнародних наукових конференціях [10–31], з яких дві проходили під егідою IEEE.

Обсяг та структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та одного додатку. Загальний обсяг роботи складає 160 сторінок друкарського тексту, із них 11 сторінок із рисунками. Список використаних джерел містить 107 найменувань на 12 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** розкрито стан дослідженої проблеми, обґрунтовано актуальність теми роботи, сформульовано наукову задачу та визначено мету досліджень. Зазначено наукову новизну та практичне значення отриманих у роботі результатів. Наведено дані про публікації автора за темою дисертації.

У **першому розділі** на основі аналізу стану сучасних ТКМ встановлено, що подальший розвиток ТСП/ІР-мереж пов'язують з реалізацією ідей, які покладені в ПК-ТКМ, яка сьогодні активно розвивається і, за думкою своїх розробників, повинна

ефективно доповнити та модернізувати багато існуючих мережних технологій. Головна перевага ПК-ТКМ полягає у можливості більш гнучко управляти телекомунікаційною мережею, що призводить до покращення показників QoS. Головна ідея ПК-ТКМ полягає у відділенні рівня управління (control plane) від рівня передачі даних (forwarding data plane), що передбачає перенесення деяких основних функцій управління від операційних системи (ОС) вузлів (маршрутизаторів і комутаторів) ТКМ до мережної ОС, яка встановлена на спеціальному контролері (сервері).

Проведено аналіз особливостей побудови ПК-ТКМ, а також механізмів забезпечення QoS в цих мережах. З'ясовано, що важливим напрямком у розвитку ПК-ТКМ є адаптація мережних протоколів та окремих механізмів управління трафіком під особливості нової технології, особливо це стосується розв'язання задачі маршрутизації. Під час дослідження було встановлено, що на сьогоднішній день протоколи маршрутизації з метою забезпечення зростаючих вимог щодо QoS свої класичні функції (розрахунок маршрутів) розширюють у напрямку підтримки додаткових можливостей, серед яких підтримка Traffic Engineering (TE) і балансування навантаження по каналах ТКМ з реалізацією багатошляхової стратегії маршрутизації. Проведено аналіз особливостей реалізації балансування навантаження в сучасних протоколах маршрутизації і встановлено, що балансування навантаження на практиці далеко не завжди сприяє максимально можливому покращенню показників QoS. В першу чергу, це пов'язано з неадекватністю математичних моделей, покладених в основу відповідних протоколів маршрутизації. У зв'язку з цим обґрунтовано наукову задачу та здійснено її декомпозицію на окремі задачі дослідження.

У **другому розділі** було проведено аналіз існуючих математичних моделей багатошляхової маршрутизації з балансуванням навантаження. Встановлено, що поточкові моделі маршрутизації найбільш повно враховують параметри каналів зв'язку і переданих потоків, а також враховують потоковий характер циркулюючого в ТКМ мультимедійного трафіка. Показано, що в потокових моделях основна увага приділяється опису функціональних властивостей модельованого процесу. Запропоновано використання потокових моделей при розв'язанні задач маршрутизації для отримання найбільш ефективних рішень.

У результаті проведеного дослідження математичних моделей багатошляхової маршрутизації з балансуванням навантаження було обрано базову модель багатошляхової маршрутизації (Модель М1), в якій використовується критерій, пов'язаний з мінімізацією коефіцієнта максимального використання каналів зв'язку. Ця модель розглядається як досить точна реалізація принципів Traffic Engineering і характеризується прийнятною складністю розрахунків.

В рамках базової моделі маршрутизації структура ТКМ описується за допомогою графа $G = (V, E)$, де V – множина вузлів мережі, E – множина каналів зв'язку.

Для кожної дуги $(i, j) \in E$ характерна її пропускна здатність c_{ij} . Кожному потоку з множини K відповідає ряд параметрів: нехай d_k, s_k, t_k – інтенсивність k -го потоку, вузол-джерело і вузол-отримувач відповідно. Управляючою величиною слугує змінна y_{ij}^k , яка характеризує долю k -го потоку, який протікає у каналі $(i, j) \in E$. Відповідно до фізики задачі, яка розв’язується, на змінні y_{ij}^k накладаються наступні обмеження:

$$0 \leq y_{ij}^k \leq 1. \quad (1)$$

У базовій моделі враховується умова збереження потоку

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j:(i,j) \in E} y_{ij}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} y_{ji}^k = 0, \quad k \in K, i \neq s_k, t_k, \\ \sum_{j:(i,j) \in E} y_{ij}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} y_{ji}^k = 1, \quad k \in K, i = s_k, \\ \sum_{j:(i,j) \in E} y_{ij}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} y_{ji}^k = -1, \quad k \in K, i = t_k. \end{array} \right. \quad (2)$$

та умова запобігання перевантаження у каналах мережі:

$$\sum_{k \in K} d_k y_{ij}^k \leq c_{ij} \alpha, \quad (i, j) \in E, \quad (3) \quad \sum_{k \in K} d_k y_{ij}^k + \sum_{k \in K} d_k y_{ji}^k \leq c_{ij} \alpha, \quad (i, j) \in E, \quad (4)$$

де α – динамічно керований поріг максимального завантаження каналів ТКМ ($0 \leq \alpha \leq 1$). Умова (3) використовується для симплексних та дуплексних каналів зв’язку, а умова (4) – для напівдуплексних каналів зв’язку.

У ході розв’язання задачі маршрутизації мінімізується величина α :

$$\alpha \rightarrow \min. \quad (5)$$

Перевагою даної моделі є те, що коефіцієнт балансування α із зростанням завантаженості мережі зростає лінійно, що гарантує відсутність коливань у числових значеннях основних показників якості обслуговування.

У результаті аналізу базової моделі були визначені її основні недоліки.

Перший недолік базової моделі. Вперше встановлено, що при багатошляховій маршрутизації з балансуванням навантаження в рамках базової моделі в

гетерогенній ТКМ з дуплексними та (або) напівдуплексними каналами виникає зациклювання пакетів. У зв'язку з цим запропоновано ряд способів вдосконалення базової моделі, що пов'язані з переглядом самої моделі або методики її використання. Як найбільш ефективний пропонується до використання спосіб, який полягає у введенні в структуру моделі додаткових нелінійних за своєю природою обмежень:

$$y_{i,j}^k \cdot y_{j,i}^k = 0, (i, j) \in E, k \in K, \quad (6)$$

що гарантувало відсутність «петель» без зниження якості балансування.

Другий недолік базової моделі. Вперше встановлено, що при реалізації багатошляхової маршрутизації з балансуванням навантаження в рамках базової моделі для ТКМ з неоднорідною топологією, які представлені розділимим графом, не забезпечується максимальне покращення основних показників QoS. Це відбувається у зв'язку з тим, що значення коефіцієнтів використання каналів зв'язку в ТКМ в цілому визначаються значенням цього коефіцієнта для каналів, що утворюють максимальний розріз мережі. Коефіцієнт використання каналів зв'язку, які утворюють максимальний розріз, набуває свого найбільшого значення, чим перешкоджає мінімізації коефіцієнтів використання в інших каналах ТКМ. У зв'язку з цим отримав подальший розвиток метод маршрутизації з балансуванням навантаження, який відрізняється від відомих рішень тим, що задача маршрутизації розв'язується не централізовано, а шляхом використання підходу «за підмережами». Запропонований метод дозволяє покращити ефективність балансування навантаження за всіма каналами ТКМ і підвищити числові значення показників QoS, в тому числі значення міжкінцевої багатошляхової затримки пакетів від 7-11 % до 24-30 % в залежності від ступеня неоднорідності структури мережі.

Доведено, що якість балансування при розв'язанні задачі маршрутизації в рамках базової моделі нелінійно залежить від структурних (топологія ТКМ, зв'язність вузлів, ступінь неоднорідності), функціональних параметрів мережі (пропускні здатності каналів мережі, характеристики маршрутизаторів), характеристик потоків (середня інтенсивність, напрямок передачі, довжина пакетів, кількість потоків, вимоги до якості обслуговування). Обґрунтовано, що в рамках базової моделі маршрутизації не проводилися врахування важливих параметрів QoS. Тому виникає необхідність у використанні більш інформативних моделей маршрутизації. У зв'язку з цим при розв'язанні задачі маршрутизації в ПК-ТКМ рекомендується змінити критерій, покладений в основу оптимізації процесу балансування навантаження, так щоб забезпечити максимальне покращення значень основних показників QoS.

У **третьому розділі** запропоновано потокову модель багатошляхової маршрутизації з балансуванням навантаження за критерієм, пов'язаним з довжиною черги

на вузлах ПК-ТКМ. Керуючою змінною даної моделі є величина x_{ij}^k , яка характеризує долю k -го потоку, який протікає в каналі $(i, j) \in E$. Відповідно до фізики задачі на змінні x_{ij}^k накладаються обмеження:

$$0 \leq x_{ij}^k \leq 1. \quad (7)$$

В моделі передбачено умову запобігання перевантаження в каналах зв'язку:

$$\sum_{k \in K} d_k x_{i,j}^k \leq c_{i,j}, (i, j) \in E. \quad (8)$$

З метою врахування можливих втрат пакетів на вузлах ТКМ, викликаних переповненням черг на їх інтерфейсах, слід використати умову збереження потоку:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j:(i,j) \in E} x_{i,j}^k - \sum_{j:(j,i) \in E} x_{j,i}^k (1 - p_{(j,i)}^k) = 0, k \in K, i \neq s_k, t_k, \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{i,j}^k = 1, k \in K, i = s_k, \\ \sum_{j:(i,j) \in E} x_{j,i}^k (1 - p_{(i,j)}^k) = \varepsilon^k, k \in K, i = t_k, \end{array} \right. \quad (9)$$

де $p_{(i,j)}^k$ – ймовірність втрат пакетів k -го потоку на j -му інтерфейсі i -го маршрутизатора з причини його перевантаження; ε^k – доля пакетів k -го потоку, який обслуговується ТКМ, тобто пакети якого доставлені від вузла-джерела до вузла-отримувача.

Щоб врахувати вимоги щодо рівня QoS, в модель маршрутизації з балансуванням навантаження вводиться додаткове обмеження. Нехай p_{oon}^k – допустима ймовірність втрат пакетів k -го потоку, тоді

$$\sum_{(i,j) \in E} p_{(i,j)}^k x_{ij}^k \leq p_{oon}^k. \quad (10)$$

В моделі багатошляхової маршрутизації використовуються наступні варіанти критеріїв балансування навантаження:

$$\min_x \left(\sum_{(i,j) \in E} (a_{i,j} n_{i,j}) \right); \quad (11)$$

$$\min_x \left(\max_{(i,j) \in E} a_{i,j} n_{i,j} \right), \quad (12)$$

де $a_{i,j}$ – ваговий коефіцієнт черги, що залежить від важливості (пріоритетності) того чи іншого каналу зв'язку $(i,j) \in E$, його місця в структурі ТКМ, а також пов'язаний з пріоритетом пакетів, які передаються даним каналом; $n_{i,j}$ – середня довжина черги в i -му маршрутизаторі на вихідному інтерфейсі до j -го маршрутизатора $(i,j \in V, i \neq j)$.

Запропоновано потокову модель адаптивної маршрутизації для ПК-ТКМ (Модель М4) за критерієм, пов'язаним з середньою багатошляховою затримкою пакетів. За основу розробленої моделі обрано базову модель маршрутизації (7), (9), (10). Умова запобігання перевантаження в каналах зв'язку в моделі набуває вигляду:

$$\sum_{k \in K} d_k x_{i,j}^k \leq c_{i,j} \alpha, (i,j) \in E. \quad (13)$$

Новизна моделі полягає в тому, що як умова балансування використовується рівність нулю контурних затримок пакетів для кожного потоку окремо:

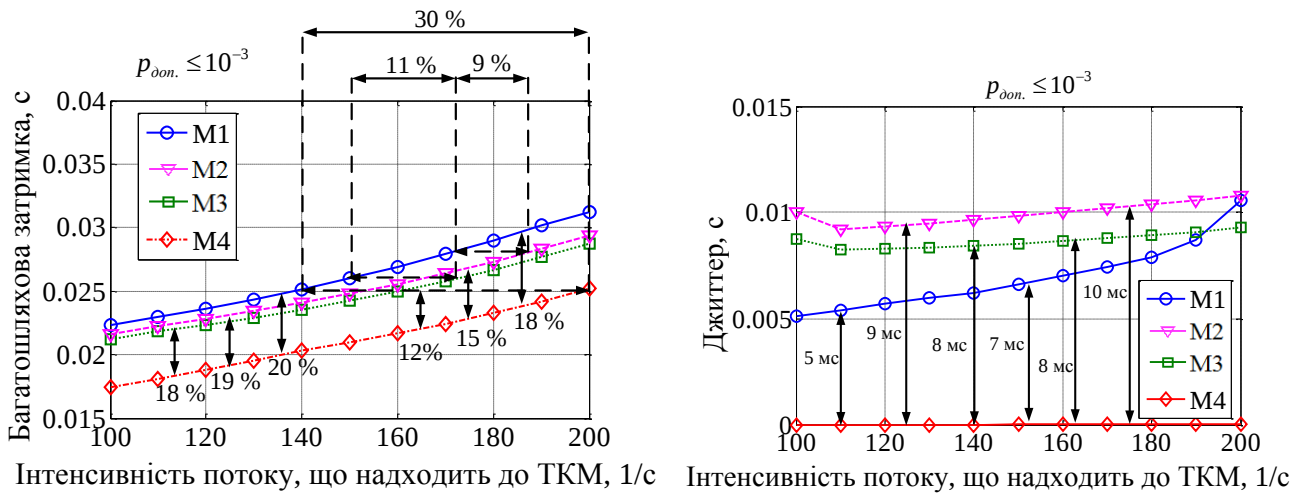
$$\vec{\tau}^k = [\tau_1^k, \tau_2^k, \dots, \tau_r^k] = 0, \quad k \in K, \quad (14)$$

де $\vec{\tau}^k$ – вектор контурних затримок, координати τ_i^k якого визначають алгебраїчну суму затримок вздовж кожного незалежного контуру з врахуванням орієнтації дуг у графі, який відображає структуру ТКМ, при передачі пакетів k -го потоку; r – кількість незалежних контурів.

Виконання умови (13) дозволяє забезпечити однакові вздовж всіх шляхів доставки пакетів k -го потоку середні затримки, а також усунути контури в маршрутах обслуговування потоків.

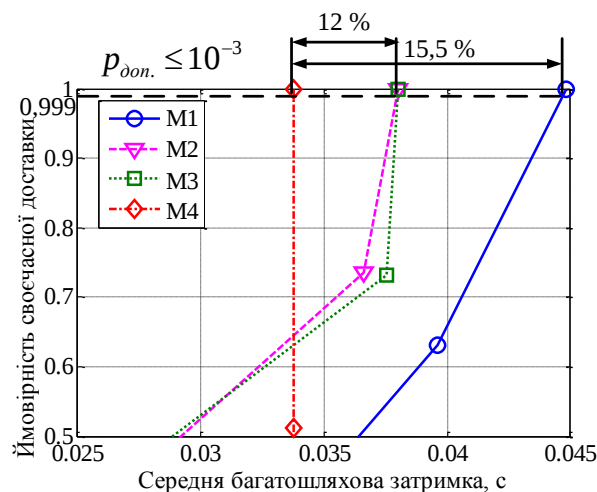
Працездатність запропонованих поточкових моделей багатошляхової маршрутизації з балансуванням навантаження за критеріями, що пов'язані з мінімізацією сумарної довжини черги на інтерфейсах ТКМ (модель М2), з мінімізацією максимальної довжини черги на інтерфейсах ТКМ (модель М3) і з сумарною багатошляховою затримкою пакетів (модель М4), була перевірена на ряді прикладів для різних типів потоків, що надходять до мережі, для різних структур ПК-ТКМ. Для порівняльного аналізу запропонованих моделей М2, М3 і М4 з базовою моделлю було оцінено кінцеві рішення за середніми затримками пакетів, джиттером, який виникав внаслідок реалізації багатошляхової стратегії маршрутизації, та ймовірністю своєчасної доставки пакетів. Моделювання SMTP/TCP потоку проводилось в рамках системи масо-

вого обслуговування (СМО) М/М/1/Н, а VoIP, FTP/TCP, HTTP/TCP, IP, Ethernet потоків – в рамках СМО fBM/М/1/Н. Приклад порівняльного аналізу моделей для потоку VoIP, FTP/TCP, HTTP/TCP, IP, Ethernet представлений на рис. 1.



а) за середньою багатошляховою затримкою;

б) за багатошляховим джитером;



в) за ймовірністю своєчасної доставки при інтенсивності потоку, що надходить до мережі, 200 1/с

Рис.1. Порівняння моделей багатошляхової маршрутизації за ключовими показниками якості обслуговування за умови, що до мережі надходять VoIP, FTP/TCP, HTTP/TCP, IP або Ethernet потоки

Встановлено, що використання запропонованих у даній роботі моделей в порівнянні з використанням базової моделі M1 дозволило покращити значення багатошляхової затримки для SMTP/TCP потоку в середньому від 2-4,6 % до 9,5-12,4 % для моделі M2; від 6-10,6 % до 12,5 - 18,4 % для моделі M3; від 18-19 % до 22-25 % для моделі M4. Для потоків VoIP, FTP/TCP, HTTP/TCP, IP або Ethernet використання запропонованих у даній роботі моделей в порівнянні з використанням базової моде-

лі M1 дозволило покращити значення багатошляхової затримки в середньому від 7-9 % до 11-20 % для моделі M2; від 8-11 % до 14-21 % для моделі M3; і від 10-12 % до 17-25 % для моделі M4 (рис.1 а). При аналізі джитеру пакетів, викликаного реалізацією багатошляхової стратегії маршрутизації, помічено, що так як середні затримки пакетів вздовж всіх шляхів, розраховані в рамках моделі M4, були рівні між собою, то багатошляховий джиттер пакетів приблизно дорівнював нулю (рис.1 б).

Для використання розроблених моделей багатошляхової маршрутизації на практиці розроблено метод адаптивної маршрутизації з балансуванням навантаження для ПК-ТКМ, який комбіновано використовував відомі (модель одношляхової маршрутизації, базову модель), а також розроблені моделі маршрутизації (моделі M2, M3, M4). Порядок використання тієї чи іншої моделі маршрутизації визначався після збору та аналізу вихідних даних на основі моніторингу стану каналів зв'язку, їх завантаженості, стану маршрутизаторів та їх інтерфейсів, характеристик трафіка, що надходив у мережу, кількості потоків та інтенсивності кожного з них, вимог до якості обслуговування того чи іншого потоку.

В **четвертому розділі** для перевірки адекватності розроблених моделей було проведено натурний експеримент з використанням обладнання компанії Cisco Systems в рамках лабораторії систем розподілу інформації кафедри телекомунікаційних систем ХНУРЕ. В результаті проведеного експерименту були підтверджені результати математичного моделювання та ефективність застосування запропонованих в роботі рішень. На основі проведеної роботи були вироблені рекомендації щодо практичного застосування розроблених моделей маршрутизації і методу.

ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальну наукову задачу, пов'язану з удосконаленням і розробкою математичних моделей і методів багатошляхової маршрутизації з балансуванням навантаження для програмно-конфігурованих телекомунікаційних мереж.

В процесі розв'язання поставленої наукової задачі зроблено такі висновки:

1. Встановлено, що підтримка балансування навантаження по каналах ПК-ТКМ при розв'язанні задачі багатошляхової маршрутизації дозволяє більш ефективно використовувати ресурси мережі та призводить до покращення показників якості обслуговування. Однак в результаті проведеного дослідження було помічено, що балансування навантаження на практиці далеко не завжди (не для всіх вихідних даних) сприяє максимально можливому покращенню показників QoS, що пов'язано з недосконалістю математичних моделей, покладених в основу відповідних протоколів маршрутизації.

2. На основі проведеного дослідження було обрано базову модель багатошляхової маршрутизації (модель M1), в якій використовується критерій оптимальності,

пов'язаний з мінімізацією коефіцієнта максимального використання каналів зв'язку, яка розглядається як вдала реалізація принципів Traffic Engineering. У результаті аналізу базової моделі встановлені її основні недоліки.

Перший недолік полягав у тому, що при багатошляховій маршрутизації з балансуванням навантаження в рамках базової моделі в гетерогенній ТКМ з дуплексними і (або) напівдуплексними каналами виникають шляхи, що містять «петлі», тобто виникає зациклювання пакетів. У зв'язку з цим запропоновано ряд способів вдосконалення базової моделі, що пов'язані з переглядом самої моделі або методики її використання. Як найбільш ефективний пропонується до використання спосіб, який полягає у введенні в структуру моделі додаткових нелінійних за своєю природою обмежень, що гарантувало відсутність «петель» без зниження якості балансування.

Другий недолік полягав у тому, що для ТКМ з неоднорідною топологією, особливо для мереж, представлених розділимим графом, не забезпечується максимальне покращення основних показників QoS. Встановлено, що це відбувається тому, що значення коефіцієнтів використання каналів зв'язку в ТКМ в цілому визначаються його значенням для каналів, що утворюють максимальний розріз. Коефіцієнт використання каналів зв'язку, які утворюють максимальний розріз, набуває свого найбільшого значення, чим перешкоджає мінімізації коефіцієнтів використання в інших каналах ТКМ. У зв'язку з цим отримав подальший розвиток метод маршрутизації з балансуванням навантаження, який відрізняється від відомих рішень тим, що задача маршрутизації розв'язується не централізовано, а шляхом використання підходу «за підмережами».

3. Доведено, що якість балансування при розв'язанні задачі маршрутизації в рамках базової моделі нелінійно залежить від структурних, функціональних параметрів мережі, характеристик потоків. Обґрунтовано, що в рамках базової моделі маршрутизації не проводилися врахування важливих параметрів QoS. Тому виникає необхідність у використанні більш інформативних моделей маршрутизації.

4. Запропоновано потокову модель багатошляхової маршрутизації з балансуванням навантаження за критерієм, що пов'язаний з довжиною черги на вузлах ПК-ТКМ. У першому випадку мінімізації підлягала взважена сумарна довжина черги (модель М2). У другому випадку – максимальна за всіма довжинами черг на маршрутизаторах ТКМ (модель М3). Використання запропонованих моделей М2 і М3 сприяє мінімізації середніх затримок пакетів від 2-4,6 % до 11-20 % у порівнянні з базовою моделлю в залежності від типу потоку, що надходить до ТКМ.

5. Запропоновано потокову модель адаптивної маршрутизації для ПК-ТКМ з балансуванням навантаження (модель М4). Новизна моделі полягає в тому, що як умова балансування виступає рівність нулю контурних затримок пакетів для кожного потоку окремо. Використання запропонованої моделі дозволяє покращити значення міжкінцевої багатошляхової затримки від 10-12 % до 20-25 % в порівнянні з

базовою моделлю у залежності від типу потоку, що надходить до ТКМ, а також мінімізувати джиттер, що викликаний реалізацією багатошляхової стратегії маршрутизації, при заданих вимогах щодо швидкості передачі та імовірності втрати пакетів.

6. Працездатність запропонованих поточкових моделей багатошляхової маршрутизації з балансуванням навантаження була перевірена на ряді прикладів для різних типів трафіка, що надходить до мережі, для різних структур ПК-ТКМ. Проведено порівняння розроблених моделей маршрутизації з базовою моделлю багатошляхової маршрутизації. Для реалізації запропонованих моделей на практиці запропоновано метод адаптивної маршрутизації з балансуванням навантаження для ПК-ТКМ, який комбіновано використовував відомі і розроблені в даній роботі моделі маршрутизації. Для перевірки адекватності розроблених моделей було проведено лабораторний експеримент.

7. Розроблено рекомендації щодо практичного застосування запропонованих моделей і методу. Запропоновані моделі рекомендується застосовувати в залежності від поточного стану інтерфейсів маршрутизаторів і каналів зв'язку ТКМ, а також в залежності від вимог до показників QoS потоку, що надходить до мережі.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Лемешко А.В. Анализ решений задач однопутевой и многопутевой маршрутизации многопоточкового трафика в телекоммуникационных сетях / А.В. Лемешко, Т.В. Вавенко // Системи обробки інформації: Зб. наук. пр. – Х.: ХУПС – 2011. – Вип. 8(98). – С. 224-228.

2. Лемешко А.В. Усовершенствование потоковой модели многопутевой маршрутизации на основе балансировки нагрузки [Электронный ресурс] / А.В. Лемешко, Т.В. Вавенко // Проблемы телекоммуникаций. – 2012. – № 1 (6). – С. 12-29. – Режим доступа к журн.: http://pt.journal.kh.ua/2012/1/1/121_lemeshko_multipath.pdf.

3. Стерин В.Л. Маршрутизация с балансировкой нагрузки по длине очереди на узлах телекоммуникационной сети / В.Л. Стерин, Т.В. Вавенко, Д.М. Еферов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х: НТУ «ХПІ». – 2013. – №1 (977). – С. 45-49.

4. 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.

5. Вавенко Т.В. Поточковая модель маршрутизации с балансировкой нагрузки по показателям качества обслуживания / Т.В. Вавенко, Феми Адефисан // Системи обробки інформації: зб. наук. пр. – Х.:ХУПС. – 2012. – Вип. 9 (107). – С.157-164.

6. Лемешко А.В. Потокковая модель маршрутизации с балансировкой нагрузки по показателям качества обслуживания / А.В. Лемешко, Т.В. Вавенко // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. – Ростов-на-Дону: ПЦ «Университет» СКФ МТУСИ. – 2013. – С. 68-72.

7. Лемешко А.В. Разработка и исследование потокковой модели адаптивной маршрутизации в программно-конфигурируемых сетях с балансировкой загрузки / А.В. Лемешко, Т.В. Вавенко // Доклады ТУСУРа. – 2013. – № 3 (29). – С. 100-108.

8. Патент на корисну модель 76563 Україна, МПК G06G 3/00 (2013.01). Спосіб балансування навантаження в телекомунікаційних мережах з неоднорідною структурою / О.В. Лемешко, О.Ю. Євсєєва, Т.В. Вавенко, Т.М. Коваленко; власник Харківський національний університет радіоелектроніки. – № у 2012 07118 Заявл. 12.06.2012; опубл. 10.01.2013. Бюл. №1.

9. Патент на корисну модель 84986 Україна, МПК G06G 3/00 (2013.01). Спосіб маршрутизації з балансуванням навантаження в телекомунікаційних мережах / О.В. Лемешко, Т.В. Вавенко, В.Л. Стерін, О.Ю. Євсєєва, С.В. Гаркуша; власник Харківський національний університет радіоелектроніки. – № у 2013 04667 Заявл. 15.04.2013; опубл. 11.11.2013. Бюл. №21.

10. Добрышкин Ю.Н. Потокковая модель ограничения интенсивности трафика на узлах MPLS-сети / Ю.Н. Добрышкин, С.А. Щербинин, Т.В. Вавенко // Труды научно-технической конференции с международным участием "Компьютерное моделирование в наукоемких технологиях". – Х.: ХНУ. – 2010. – С. 88-91.

11. Вавенко Т.В. Управление трафиком с его превентивным ограничением на основе абсолютных приоритетов / Т.В. Вавенко // 14-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», 18-20 марта 2010 г.: Сб. материалов форума. Ч.1. – Харьков: ХНУРЕ, 2010. – С.139.

12. Добрышкин Ю.Н. Модель управления трафиком с его превентивным ограничением на основе абсолютных и относительных приоритетов / Ю.Н. Добрышкин, Т.В. Вавенко // Нові технології в телекомунікаціях: III-й Міжнар. наук.-техн. симпозіум, 2-5 лютого 2010 р.: Зб. тез. – К.: ДУІКТ, 2010. – С. 32-34.

13. Вавенко Т.В. Моделирование задачи маршрутизации в сетях с дуплексными каналами связи / Т.В. Вавенко, М.В. Семеняка // Перспективные технологии в средствах передачи информации ПТСПИ'2011: IX Междунар. науч.-техн. конф., 29 июня – 01 июля 2011 г.: Сб. материалов конференции. – Владимир, 2011. – С. 245-248.

14. Андрушко Д.В. Модель маршрутизации с балансировкой нагрузки в сетях с дуплексными каналами / Д.В. Андрушко, Т.В. Вавенко, М.В. Семеняка // Технологии информатизации и управления ТИМ-2011: II Междунар. науч.-практ. конф., 26-27 апреля 2011 г.: Сб. материалов конференции. – Гродно, Беларусь, 2011.

15. Вавенко Т.В. Анализ многопутевой маршрутизации для сетей с неравномерной топологией / Т.В. Вавенко, М.В. Семеняка // VIII Міжнародна

науково-технічна конференція студентства та молоді «Світ інформації та телекомунікацій – 2011», 27-28 квітня 2011 р.: Зб.тез. – К. ДУІКТ, 2011. – С.45.

16. Вавенко Т.В. Особенности решения задачи маршрутизации с учетом технологии Traffic Engineering для сетей, представленных соединенным графом / Т.В. Вавенко // 4-й Международный радиоэлектронный форум "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития (МРФ 2011)": Сб. науч. трудов – Харьков: ХНУРЭ. – 2011. – Т.2. – С. 98-101.

17. Вавенко Т.В. Математическое моделирование задач маршрутизации для сетей с дуплексными каналами / Т.В. Вавенко // 15-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», 18-20 апреля 2011 г.: Сб. материалов форума. Т.4. – Харьков: ХНУРЭ, 2011. – С.15-16.

18. Вавенко Т.В. Анализ недостатков маршрутизации на основе балансировки нагрузки / Т.В. Вавенко, М.В. Семеняка // Перша міжнародна науково-практична конференція молодих вчених «Інфокомунікації – сучасність та майбутнє», 6-7 жовтня 2011р.: Зб. тез. Т.4. – Одеса: ОНАЗ, 2011. – С.62-66.

19. Вавенко Т.В. Особенности моделирования процессов маршрутизации в сетях с дуплексными каналами связи / Т.В. Вавенко // П'ята міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій», 19-22 квітня 2011 р.: Зб. тез. – Київ, НТУУ КПІ, 2011. – С.52.

20. Вавенко Т.В. Исследование потоковой модели маршрутизации с балансировкой нагрузки для структурно нерегулярных сетей / Т.В. Вавенко // 16-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», 17-19 апреля 2012 г.: Сб. материалов форума. Т.4. Харьков: ХНУРЭ, 2012. – С.20-21.

21. Вавенко Т.В. Способ улучшения уровня балансировки в потоковой модели маршрутизации с балансировкой загрузки / Т.В. Вавенко // 8-а міжнародна молодіжна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій «РТ - 2012», 23-27 квітня 2012р.: Матеріали конференції. Севастополь: СевНТУ, – 2012. – С. 117.

22. Вавенко Т.В. Исследование процесса маршрутизации в сетях с неоднородной структурой / Т.В. Вавенко // Восьма наукова конференція Харківського університету повітряних сил імені Івана Кожедуба «Новітні технології – для захисту повітряного простору», 18-19 квітня 2012р.: Тези доповідей. Харків: ХУПС, – 2012. – С.50.

23. Вавенко Т.В. Результаты анализа потоковой модели маршрутизации на основе балансировки загрузки для разнотипных сетевых топологий / Т.В. Вавенко // 12-а Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів та студентів «Стан, досягнення і перспективи інформаційних систем і технологій», 11-12 квітня 2012р.: Матеріали конференції. Одеса: ОДАХ, – 2012. – С.51-53.

24. Вавенко Т.В. Потокowa модель маршрутизації на основі балансування навантаження за показниками якості обслуговування / Т.В. Вавенко // VI Міжнародна

науково-практична конференція «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій», 19-21 вересня 2012 р.: Тези доповідей. Запоріжжя: ЗНТУ, – 2012. – С. 148-149.

25. Вавенко Т.В. Потокосная модель маршрутизации на основе балансировки нагрузки по показателям качества обслуживания / Т.В. Вавенко // VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології (COMINFO'2012-Livadia)», 01-05 жовтня 2012 р.: Збірник тез. Київ: ДУІКТ, 2012. – С. 131-132.

26. Lemeshko O. Design of Multipath routing Scheme with Load Balancing in MPLS-network / O. Lemeshko, T. Vavenko, K. Ovchinnikov // Proc. in 12th International Conference "The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM'2013)". – Lviv-Polyana: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2013. – P. 211-213.

27. Вавенко Т.В. Маршрутизации на основе балансировки нагрузки по показателям качества обслуживания / Т.В. Вавенко // 17-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке», 22-24 апреля 2013 г.: Сб. материалов форума. Т.4. Харьков: ХНУРЭ, – 2013. – С.63-64.

28. Вавенко Т.В. Маршрутизация с балансировкой нагрузки по длине очереди на узлах телекоммуникационной сети / Т.В. Вавенко // Перспективные технологии в средствах передачи информации ПТСПИ'2013: X Междунар. науч.-техн. конф., 26 июня – 28 июня 2013 г.: Сб. материалов конференции. Т.1. – Владимир, 2013. – С. 96-99.

29. Вавенко Т.В. Маршрутизация с балансировкой нагрузки по длине очереди на узлах телекоммуникационной сети / Т.В. Вавенко // IX научная конференция Харьковского университета Воздушных сил им. И.Кожедуба «Новітні технології – для захисту повітряного простору», 17-18 апреля 2013 г.: Сб. докладов. Харьков: ХУПС, 2013. – С. 191-192.

30. Лемешко А.В. Разработка модели маршрутизации с балансировкой нагрузки в программно-конфигурируемых сетях / А.В. Лемешко, Т.В. Вавенко, А.А. Горюнов // Материалы 23-й Международной конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии" (КрыМиКо'2013), Севастополь, 8-13 сентября 2013 г., в 2 т. – Севастополь: Вебер, 2013. Т.1. – С. 511-512.

31. Вавенко Т.В. Потокосная модель адаптивной маршрутизации с балансировкой нагрузки для программно-конфигурируемых сетей / Т.В. Вавенко // Проблемы инфокоммуникаций. Наука и технологии (PIC S&T-2013): Сб. научных трудов первой международной научно-практической конференции. – Харьков: ХНУРЭ, 2013. – С. 161-164.