

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ**

**ЛОЗИНСЬКА ВІКТОРІЯ МИКОЛАЇВНА**



УДК 621.391

**МЕТОД УПРАВЛІННЯ ТРАФІКОМ В ПРОЦЕСІ  
ВСТАНОВЛЕННЯ ТЕ-ТУНЕЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ  
ЛІНІЙНИХ MAX-PLUS МОДЕЛЕЙ**

Спеціальність 05.12.02 – Телекомунікаційні системи та мережі

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Харків – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** кандидат технічних наук, доцент  
ДЕГТЯРЕНКО Ілля В'ячеславович  
ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»,  
доцент кафедри автоматичної та телекомунікацій

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
ПРИХОДЬКО Сергій Іванович  
Українська державна академія залізничного транспорту,  
завідувач кафедри транспортного зв'язку

кандидат технічних наук, доцент  
СОКОЛ Галина Вікторівна  
Полтавський національний технічний університет  
імені Юрія Кондратюка,  
доцент кафедри комп'ютерної інженерії

Захист відбудеться «18» березня 2015 року о 15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.09 в Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: Україна, 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

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

Автореферат розісланий « » лютого 2015 року.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Є.В. Дуравкін

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Концепція мереж нового покоління передбачає надання телекомунікаційних послуг різного типу на основі використання універсальної транспортної мережної інфраструктури. Реалізація даної концепції здійснюється завдяки механізмам та методам управління трафіком, які враховують вимоги до якості обслуговування (Quality of Service, QoS) телекомунікаційних послуг, що надаються. Найбільш розвинутою та повнофункціональною технологією для організації мультисервісних транспортних мереж на теперішній час є технологія багатопроTOCOLЬНОЇ комутації по мітках (Multiprotocol label switching, MPLS). Зокрема, вона містить розширення, спрямоване на гнучке управління трафіком (Traffic Engineering, TE). Однак не дивлячись на численні функціональні можливості, що закладені в механізмах MPLS-TE, їх потенціал наразі не реалізовано в повній мірі. Однією з причин цього є недосконалість математичних моделей та методів, що є основою протоколів маршрутизації, механізмів планування обслуговування черг та методів оцінки пропускну здатності для TE-тунелів. Аналіз цих математичних моделей та методів дозволив виявити їх основний недолік – статичність представлення відповідних процесів телекомунікаційних мереж.

У зв'язку з вищезазначеним тематика дисертаційної роботи, яка присвячена вирішенню *наукової задачі*, що пов'язана з розробкою та удосконаленням моделей та методів управління трафіком в MPLS-мережах за умови реалізації стратегії встановлення та підтримки TE-тунелів для мультисервісного трафіка, є *актуальною*.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційні дослідження виконано в рамках положень Державної програми розвитку «Основні наукові напрямки та найважливіші проблеми фундаментальних досліджень в галузі природних, технічних та гуманітарних наук на 2009-2013 рр», пункт 1.2.5.2 «Науково-технічне забезпечення процесів конвергенції в телекомунікаційних мережах», що затверджена наказом МОН України, Національною Академією Наук України від 26.11.09 № 1066/609. Результати дисертаційної роботи є складовими частинами НДР Н-03-11 «Дослідження і розробка методів проектування та підвищення технічної ефективності цифрових систем управління, інформаційно-вимірювальних систем і телекомунікацій» та ДР № 0111U001424 «Розробка теорії синтезу дискретно-безперервних систем автоматичного керування технологічними об'єктами», що виконувались в ДВНЗ «ДонНТУ». Запропоновані в роботі моделі та методи управління трафіком використовуються у навчальному процесі кафедри автоматики і телекомунікацій ДВНЗ «ДонНТУ». Впровадження результатів дисертаційної роботи підтверджено відповідними актами.

**Метою досліджень** є підвищення ефективності роботи транспортних MPLS-мереж за рахунок розробки методу управління трафіком, що базується на дискретно-

подієвих моделях телекомунікаційних процесів. У ході розв'язання поставленої наукової задачі сформульовано та вирішено наступні завдання:

- аналіз існуючих моделей та методів управління трафіком в транспортних MPLS-мережах;
- розробка дискретно-подієвих моделей механізмів управління трафіком транспортних MPLS-мереж;
- розробка методу управління трафіком транспортних MPLS-мереж, що базується на запропонованих математичних моделях;
- оцінка ефективності та розробка рекомендацій щодо практичного використання запропонованих у дисертації рішень.

**Об'єкт дослідження:** процес управління трафіком в транспортних MPLS-мережах.

**Предмет дослідження:** моделі та методи управління трафіком в транспортних MPLS-мережах.

**Методи дослідження.** В роботі знайшли своє застосування методи математичного моделювання, інтерполяційні методи, методи прогнозування часових серій, методи теорії телетрафіка, методи теорії мереж, методи теорії дискретно-подієвих систем та ідемпотентної алгебри.

**Наукова новизна отриманих результатів.** Під час розв'язання поставлених задач були отримані наступні нові наукові результати:

- отримав подальший розвиток метод маршрутизації «від джерела» з підтримкою якості обслуговування для MPLS-мереж. Новизна методу полягає у формуванні композитних маршрутних метрик, які розраховуються на основі функцій «корисності» трафіка різних телекомунікаційних послуг, що дозволило формувати TE-тунелі відповідно до характеристик трафіка, який ними буде передано;
- вперше розроблено метод оцінки пропускну здатності віртуальних каналів телекомунікаційної мережі, який відрізняється від існуючих використанням прогностичної ARFIMA-моделі, що враховує фрактальні властивості трафіка. Це дозволило зменшити обсяг використаного каналного ресурсу із забезпеченням заданих параметрів обслуговування в середньому на 18%;
- вперше розроблено дискретно-подієву модель роботи планувальника приграничного мережного пристрою в базисі Max-Plus алгебри, яка враховує затримки на обробку пакетів та дозволяє формалізувати процес управління чергами пакетів в просторі станів. На основі розробленої моделі запропоновано метод оцінки розміру буферів черг MPLS-маршрутизатора, який дозволяє підвищити точність оцінок міжкінцевих затримок передачі трафіка.

**Обґрунтованість та достовірність отриманих у роботі нових наукових результатів** забезпечувалась та підтверджувалась коректним використанням ключових положень відомого та добре апробованого математичного апарату – теорії ідемпотентних алгебр та математичного моделювання, а також ретельним аналітичним обґрунтуванням прийнятих наближень. Достовірність результатів дисертаційної роботи визначалася допустимим збігом результатів аналітичного та імітаційного моделювання.

**Наукове значення** результатів роботи полягає в узагальненні та подальшому розвитку теорії та методів управління трафіком і мережних ресурсів ТКМ за рахунок розробки та вдосконалення математичних моделей останніх. Використання запропонованих моделей та методу дозволило більш системно підійти до формулювання та рішення окремих завдань управління трафіком (QoS-маршрутизації, розподілу та резервування каналних ресурсів), так як використання існуючих моделей та методів не в повній мірі забезпечувало комплексне врахування особливостей маршрутизації мультисервісного трафіка та динамічних стратегій обслуговування черг в транзитних вузлах.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в наступному:

- розроблено імітаційну модель роботи сегмента транспортної телекомунікаційної мережі, що дозволяє зробити оцінку працездатності та ефективності запропонованих моделей та розробленого методу управління трафіком;
- розроблено рекомендації щодо визначення параметрів методу управління трафіком стосовно підтримки працездатності встановлених TE-тунелів MPLS-мережі;
- показано, що реалізація результатів роботи дозволяє покращити ефективність використання мережних ресурсів із забезпеченням основних показників якості обслуговування (зменшити обсяг використаного каналного ресурсу при встановленні TE-тунелю на 10 – 13% в залежності від типу трафіка, який ним буде передано).

Отримані в ході виконання дисертаційної роботи результати можуть бути використані під час розробки алгоритмічного та програмного забезпечення для телекомунікаційного обладнання з метою підвищення якості обслуговування та ефективності використання каналних ресурсів. Моделі оцінки пропускну здатності TE-тунелів, що розроблені в дослідницькій роботі, використано в демонстраційній лабораторній роботі з дисципліни «Алгоритми управління та адаптації в ТКМ» на кафедрі автоматичної та телекомунікацій ДВНЗ «ДонНТУ». Крім того, результати дисертаційної роботи використано під час виконання науково-дослідних робіт № Н-03-11 «Дослідження і розробка методів проектування та підвищення технічної ефективності цифрових систем управління, інформаційно-вимірювальних систем і телекомунікацій» та ДР № 0111U001424 «Розробка теорії синтезу дискретно-

безперервних систем автоматичного керування технологічними об'єктами», які виконувалися на базі ДВНЗ «ДонНТУ» і в яких дисертант був виконавцем.

**Особистий вклад здобувача.** Усі основні наукові результати, висвітлені в дисертаційній роботі, здобувач отримав самостійно. Крім того, в роботі [1] автором розроблено математичну модель процесів в ТКМ в термінах мереж Петрі та ідемпотентних алгебр, в [2] проаналізовано існуючі математичні моделі опису роботи мережного пристрою каналного рівня та надано його опис як дискретно-подієвої системи. В роботах, що опубліковано в співавторстві, здобувачеві належить наступне: [3] – аналіз способів визначення циклічності неспрямованого графа; [4] – розробка дискретно-подієвих моделей планувальників з різними дисциплінами обслуговування черг; [5] – ідея використання апарату Min-plus алгебри для розв'язання задачі про найкоротший шлях, розробка композитної метрики для розв'язання задач QoS-маршрутизації.

**Апробація.** Результати роботи доповідалися на шістьох наукових конференціях, а саме на: XV Міжнародній конференції по автоматичному управлінню (м. Одеса, 2008); міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми та шляхи їх розв'язання в науці, транспорті, виробництві та освіті (Одеса, 2011); 22-й Міжнародній Кримській конференції «НВЧ-техніка та телекомунікаційні технології», (Севастополь, КриМіКо'2012); 11-й міжнародній науковій конференції «Контроль і управління в складних системах» (Віниця, 2012); науково-методичній конференції «Сучасні проблеми телекомунікацій ті підготовка спеціалістів в галузі телекомунікацій - 2012», (Львів, 2012); 23-й Міжнародній Кримській конференції «НВЧ-техніка та телекомунікаційні технології», (Севастополь, КриМіКо'2013).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи викладено у 11 наукових працях автора, з яких 5 статей – у фахових виданнях України. Три статті розміщено в закордонній наукометричній базі eLIBRARY.RU (РІНЦ). Одержані наукові та практичні результати апробовано на 6-х міжнародних, відомчих наукових та науково-практичних конференціях та форумах і опубліковано у матеріалах тез доповідей, з яких 2 розміщені в закордонній наукометричній базі Scopus.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається із вступу та п'яти розділів. Загальний обсяг роботи становить 152 сторінки, у тому числі 108 сторінок основного тексту, 33 рисунки, 2 таблиці усього на 32 сторінках. Список використаних джерел містить 108 найменувань, викладених на 12 сторінках, та 19 сторінок додатків

## ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовується актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета, задачі, об'єкт, предмет і методи досліджень, вказані наукова новизна та

практична цінність результатів, зв'язок з науковими програмами і планами. Наведено дані про достовірність та апробацію результатів, публікації та особистий внесок автора.

**Перший розділ** присвячено аналізу проблеми управління трафіком із забезпеченням якості обслуговування в транспортних MPLS-мережах. Зроблено аналіз методів та механізмів управління трафіком в процесі встановлення TE-тунелю. Показано, що графові моделі пошуку найкоротшого шляху в сучасних протоколах маршрутизації не враховують всі характеристики трафіка сучасних телекомунікаційних послуг. Це не дозволяє знаходити шляхи, вздовж яких забезпечуються вимоги до параметрів якості обслуговування з умовою, щоб при цьому спостерігалася збалансоване використання каналних ресурсів. Механізми планування обслуговування черг оперують статичними моделями, що не враховують складну динаміку трафіка мультисервісних послуг. Це не дозволяє знаходити адекватні оцінки необхідних каналних ресурсів. В наявних методах розрахунку пропускної здатності TE-тунелів використовуються прогностичні моделі, які мають низьку швидкість адаптації до характеристик реального трафіка. Це призводить до низької ефективності використання мережних ресурсів. Отже, обмеженість перелічених вище математичних моделей та методів управління, не дозволяє реалізувати повній мірі потенціал, що закладено в технології MPLS-TE.

Однією з основних особливостей процесів в телекомунікаційних мережах є їх дискретно-подієвий характер. У зв'язку з цим, як показали результати аналізу існуючих математичних апаратів, найбільш доцільним для формування математичних моделей телекомунікаційних процесів та систем є виростання апарату ідемпотентних  $\text{Max-plus}$  та  $\text{Max-minus}$  алгебр. Цей математичний апарат дозволяє адекватно та відносно просто описувати, моделювати та аналізувати роботу дискретно-подієвих об'єктів до яких відносяться телекомунікаційні системи.

Аналіз існуючих засобів та методів управління трафіком показав, що актуальною є науково-практична задача, що пов'язана з вдосконаленням механізмів прокладання та підтримки TE-тунелів в мережах MPLS шляхом розробки відповідних математичних моделей та методів. Реалізація даних методів та моделей повинна сприяти підвищенню ефективності використання мережних ресурсів та забезпечувати необхідний рівень якості обслуговування трафіка мультисервісних послуг.

**Другий розділ** присвячено синтезу математичних моделей основних процесів, що виникають при прокладанні та обслуговуванні TE-тунелів в MPLS мережі. Зокрема, розглянуті моделі трафіка для оцінки необхідної пропускної здатності TE-тунелів та модель планувальника обслуговування пакетів.

Базовий метод оцінки необхідної пропускної здатності TE-тунелю зараз реалізовано в механізмі *Autobandwidth* технології MPLS. Його основним недоліком є низька ефективність використання каналних ресурсів через недосконалість базової моделі трафіка. Для усунення цього недоліку в роботі було запропоновано декілька

модифікацій прогностичних моделей, що базуються на урахуванні визначених в першому розділі особливостей трафіка сучасних мультисервісних мереж, зокрема, його фрактальності.

Розрахунок пропускної здатності ТЕ-тунелю  $tun(\Delta\tau)$  на час регулювання  $\Delta\tau$  в механізмі Autobandwidth визначається за виразом:

$$tun_j(m\Delta\tau) = \max_{i=1..k}(c_j(m(k-1)+i)\Delta t), \quad (1)$$

де  $k$  – кількість статистичних інтервалів в інтервалі регулювання;  $m$  – номер інтервалу регулювання;  $c_j(i\Delta t)$  – середня інтенсивність  $j$ -го потоку трафіка на  $i$ -му статистичному інтервалі. Остання реалізується на основі середньої оцінки інтенсивності потоку трафіка на певному статистичному інтервалі довжиною  $\Delta t$ :

$$c_j(i\Delta t) = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n \lambda_j((i(n-1)+l)t), \quad (2)$$

де  $c_j(i\Delta t)$  – середня інтенсивність  $j$ -го потоку трафіка на  $i$ -му статистичному інтервалі;  $n$  – довжина статистичного інтервалу у відліках;  $\lambda_j(it)$  – миттєва інтенсивність трафіка в момент  $it$ .

Оцінка пропускної здатності ТЕ-тунелю здійснюється згідно з формулою (1) за умови вільних каналних ресурсів, тобто

$$\sum_{j=1}^N tun_j(m\Delta\tau) < C, \quad (3)$$

де  $N$  – число тунелів в одному фізичному каналі;  $C$  – пропускна спроможність фізичного каналу.

В роботі окрім базової моделі алгоритму Autobandwidth досліджені запропоновані модифікації.

1) В моделі «Максимальні значення в межах інтервалу статистики» формула (2) трансформується у вираз:

$$c_j(i\Delta t) = \max_{l=1..n} (\lambda_j((i(n-1)+l)t)). \quad (4)$$

2) В моделі «Прогностична ARFIMA-модель» замість формули (1) використовується вираз:



$$tun_j(m\Delta\tau) = \max_{i=1..k} (ARFIMA(c_j((m(k-1)+i)\Delta t))), \quad (5)$$

де  $ARFIMA(c_j((m(k-1)+i)\Delta t))$  – значення оцінок інтенсивності трафіка, що надходить, які прогнозовано згідно з ARFIMA-моделлю.

3) «Інтегральна модель» припускає знаходження оцінки пропускної здатності ТЕ-тунелю, що встановлюється, згідно з виразом:

$$tun_j(m\Delta\tau) = \frac{\int_{(m-1)\Delta\tau}^{m\Delta\tau} c_j^*(m)\Delta\tau}{\Delta\tau}, \quad (6)$$

де  $c_j^*(m\Delta\tau)$  – величини інтенсивності трафіка  $j$ -го сервісу для  $m$ -го інтервалу регулювання, які оцінено за наступним виразом:

$$c_j^*(m\Delta\tau) = ARFIMA(c_j(m(k-1)+i)\Delta\tau)). \quad (7)$$

4) «Модель з адаптивним розміром інтервалу регулювання». Для цієї моделі початок та кінець інтервалу регулювання визначені згідно з функцією добутку швидкості зміни інтенсивностей трафіка ( $Q(n\Delta t)$ ), що розраховується як:

$$Q(m\Delta\tau) = \frac{c_j^*(m\Delta\tau) - c_j^*((m-1)\Delta\tau)}{c_j^*(m\Delta\tau)}. \quad (8)$$

Якщо функція добутку швидкості змінює знак на протилежний, то фіксується початок інтервалу регулювання. Кінець інтервалу регулювання дорівнює моменту часу, коли функція добутку швидкості змінює свій знак другий раз поспіль. Розрахунок величини оцінки пропускної здатності ТЕ-тунелю, що встановлюється, відбувається згідно з (6).

Проведено імітаційне моделювання роботи даних моделей. В якості оцінок ефективності використовувались доля втрат пакетів та показник використання каналного ресурсу (див. рис.1). Виходячи з цього зроблено наступний висновок: модель з адаптивним розміром інтервалу регулювання дозволяє отримувати зменшення обсягу каналного ресурсу, що використовується, в середньому на 18%, проте спостерігається погіршення показників якості обслуговування (доля втрат) на 28%.

З метою досягнення заданого рівня показників якості обслуговування в роботі запропоновано провести модифікацію механізму планування обробки пакетів в чергах буферів прикордонних маршрутизаторів.

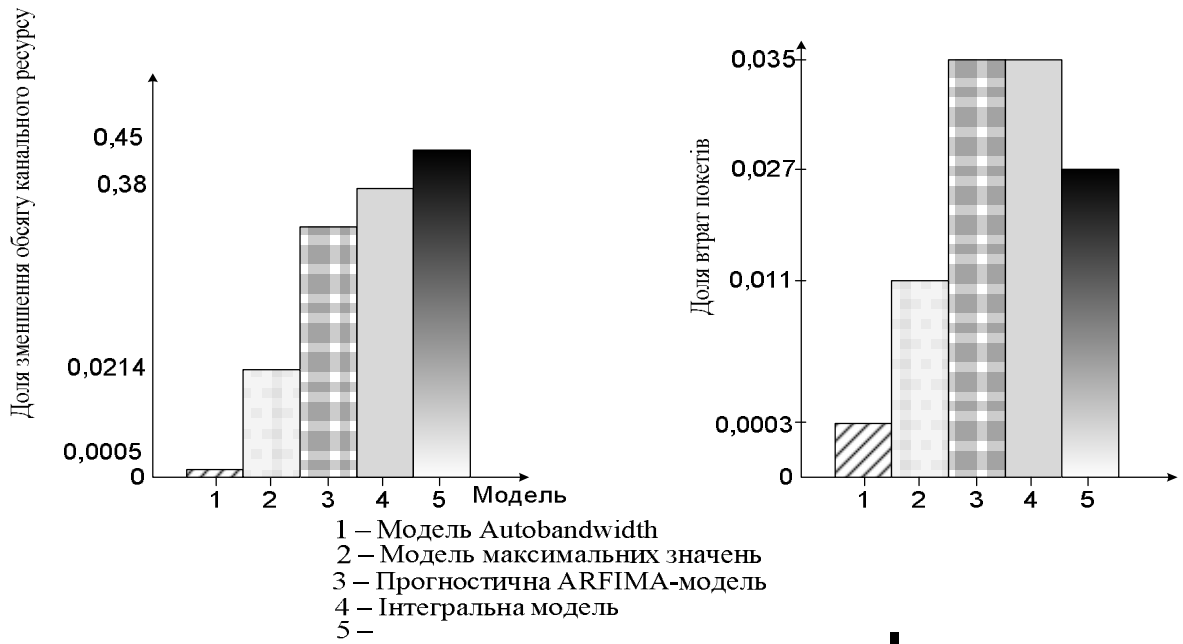


Рис. 1. Результати роботи моделей прогнозування інтенсивності трафіка

Для опису роботи даного механізму розроблено математичну модель планувальника пакетів на базі апарату Max-plus алгебри:

$$\mathbf{F}(k+1) = \max\{\mathbf{F}(k), \mathbf{V}(a(k+1))\} + \frac{\mathbf{L}(k+1)}{r}, \quad (9)$$

де  $\mathbf{F}$  – вектор-стовпець значень функції «віртуальний час», що описує час закінчення обслуговування, розмірністю  $N \times 1$ ;  $N$  – кількість «беклог»-потоків;  $\mathbf{V}$  – матриця, розмірністю  $N \times N$ , яка характеризує значення функції «віртуальний час», що описує час надходження пакетів до черг класифікатора;  $r$  – константа, що характеризує оцінку пропускну здатності, що виділяється для  $N$  «беклог»-потоків;  $\mathbf{L}(k+1)$  – вектор-стовпець, що характеризує розмір пактів, що надходять до черг класифікатора.

Затримку на обробку пакету можна формалізувати у виразі:

$$\mathbf{Dc} = \tilde{\mathbf{V}}(a(k+1)) - \mathbf{V}(a(k+1)) \quad (10)$$

з обмеженнями:

$$\mathbf{Dc} < \mathbf{D}_{QoS}, \quad \sum_{i=1}^N tun_i^{QoS} \leq C, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (11)$$

де  $\tilde{V}(a(k+1))$  – функція «віртуальний час» надходження пакетів в черги для еталонного трафіка;  $\mathbf{D}_{QoS}$  – вектор параметрів якості обслуговування для потоків трафіка;  $tun_i^{6ix}$  – оцінки пропускних здатностей ТЕ-тунелів, що встановлюються;  $C$  – пропускна здатність фізичного каналу.

Визначення величини  $\tilde{V}(a(k+1))$  засноване на (9), переписаному в термінах Max-plus  $(\bar{R}, \oplus, \cdot)$  алгебри:

$$\tilde{V}(a(k+1)) = \frac{\mathbf{L}(k+1)}{r} \otimes \tilde{\mathbf{F}}(k+1), \quad (12)$$

де  $\tilde{\mathbf{F}}(k+1)$  – вектор-стовпець значень функції «віртуальний час» закінчення обслуговування для еталонного трафіка.

Розроблена модель дозволила отримати величини оцінок затримок, що вносяться планувальником, та узгодити їх з параметрами якості обслуговування, що вимагаються. В наступному розділі на базі даної моделі розроблено метод управління планувальником, що дозволяє підвищити показники якості обслуговування мультисервісного трафіка в даному мережному пристрої.

У **третьому розділі** запропоновано метод управління трафіком в процесі встановлення ТЕ-тунелів. Цей метод заснований на запропонованих методах оцінки пропускної здатності ТЕ-тунелю, що встановлюється, оцінки розміру черг буфера планувальника та методу маршрутизації «від джерела» з підтримкою якості обслуговування.

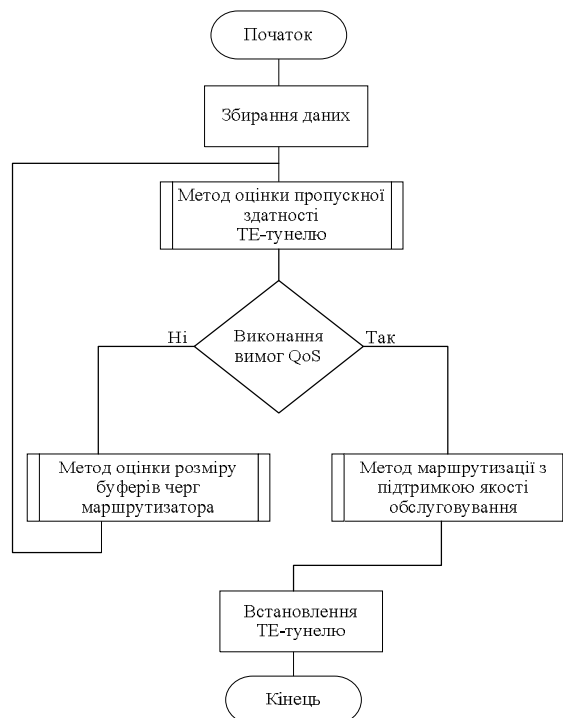


Рис. 2. Блок-схема методу управління трафіком

Перелічені методи побудовані на основі математичних моделей, які описані в попередньому розділі. Логіку роботи запропонованого методу можна надати у вигляді наступної блок-схеми (рис. 2).

Метод встановлення TE-тунелю можливо звести до методу QoS-маршрутизації «від джерела». В роботі запропонована модифікація цього методу, що об'єднує в собі розрахунок нової композитної QoS-метрики та процедуру обчислення оптимального маршруту на основі математичного апарату Min-plus алгебри.

Розроблена в роботі композитна метрика базується на функціях «корисності», що визначаються для кожної пари послуга – параметр якості обслуговування. Наприклад, для послуги VoIP функція «корисності» пропускну здатності має вигляд:

$$u_{\text{VoIP}}(c) = \frac{\text{sgn}(c - C_{\min}) + 1}{2}, \quad (13)$$

де  $C_{\min}$  – мінімально припустима пропускну здатність для заданого кодеку.

Дані функції є нормованими від 0 до 1 та відображають нелінійну залежність впливу певного параметру QoS на якість надання послуги. Для будь-якого типу трафіка можна сформуванати композитний показник якості обслуговування або композитну функцію «корисності» для певного типу трафіка:

$$Usf(SLA) = U_B(B) \cdot U_\tau(\tau) \cdot U_{\Delta t}(\Delta t) \cdot U_P(P), \quad (14)$$

де  $Usf(SLA)$  – композитна функція «корисності»;  $U_B(B)$ ,  $U_\tau(\tau)$ ,  $U_{\Delta t}(\Delta t)$ ,  $U_P(P)$  – функції «корисності» пропускну здатності, затримки, джитеру, імовірності втрат для певного типу трафіка.

Така метрика буде приймати своє максимальне значення «одиниця», якщо всі параметри QoS відповідають вимогам для цієї послуги повною мірою. Якщо хоч один параметр повністю незадоволено, то метрика приймає нульове значення. Для уникнення ситуацій, в яких усі маршрути буде відкинуто, пропонується зробити сортування параметрів якості обслуговування за важністю для кожного класу послуг (чим важливіше послуга, тим менше її номер). Це дозволить відкинути малозначущі показники QoS. Крім того, композитна метрика враховує нелінійну чуттєвість трафіка певної послуги до параметрів QoS. Згідно з отриманими метриками та враховуючи топологію мережі складається маршрутна матриця  $\mathbf{Mc} = (Mc)_{ij}$ . Для знаходження оптимального маршруту елементи матриці  $(Mc)_{ij}$  перетворюються наступним чином:  $(D)_{ij} = 1 - (Mc)_{ij}$ .

Задача обчислення оптимального маршруту в термінах Min-plus алгебри вирішується наступним чином. Для спрямованого графа  $D(V, E)$ , де  $V$  – множина вузлів

мережі,  $E$  - множина каналів зв'язку, кожній дузі  $(i, j) \in E$  відповідає її ваговий коефіцієнт  $d_{ij}$ . Необхідно обчислити матрицю  $\mathbf{D}^+$  в базисі Max-minus алгебри  $(\underline{R}, \oplus', \cdot')$ :

$$\mathbf{D}^+ = \bigoplus'_{l \in (n-1)} (\mathbf{D}^l), \quad (15)$$

де  $\mathbf{D}^l$  – матриця вагових коефіцієнтів, розмірністю  $n \times n$ ;  $n$  – кількість вузлів мережі;  $\oplus'$  – оператор знаходження мінімуму в термінах Min-plus алгебри.

Метод управління трафіком в процесі встановлення TE-тунелів може бути реалізований в прикордонному маршрутизаторі MPLS-мережі (див рис. 3).

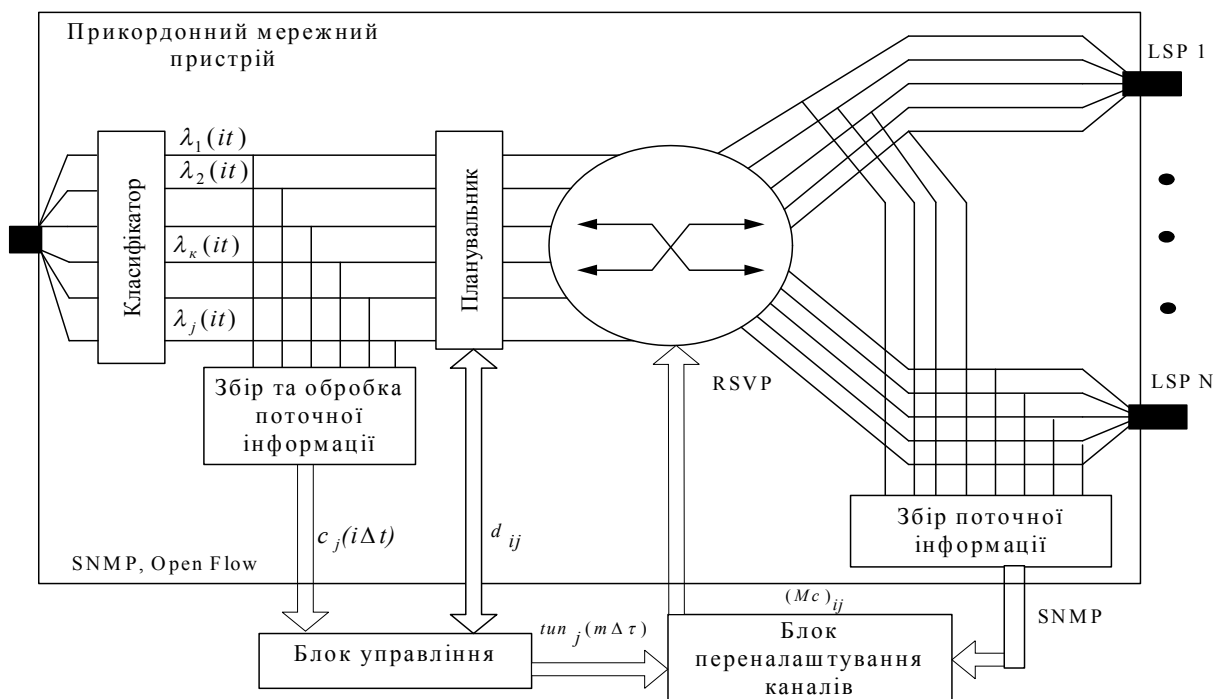
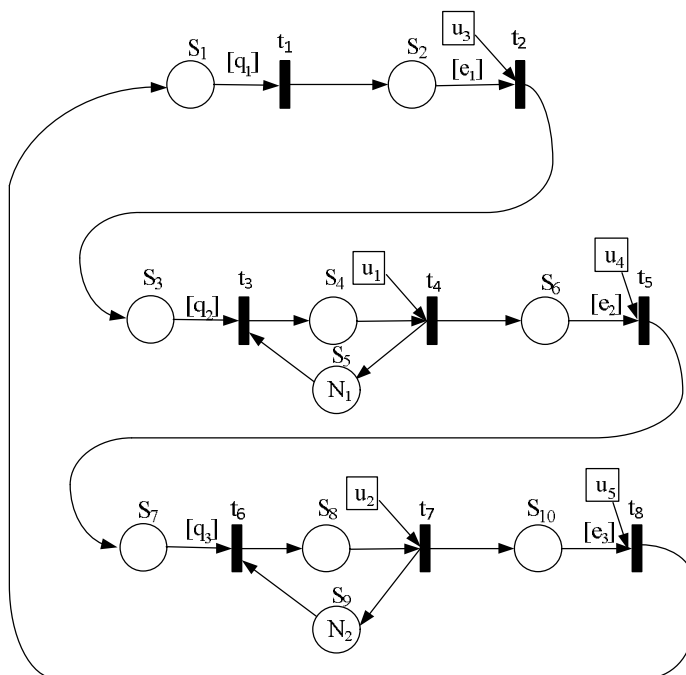


Рис. 3. Структурна схема прикордонного маршрутизатора

Крім того, даний пристрій виконує задачу підтримки необхідної пропускної здатності TE-тунелів. Для її виконання в роботі пропонується використовувати метод, який базується на прогностичній ARFIMA-моделі з адаптивним розміром інтервалу регулювання, що представлено в другому розділі роботи.

Важливим елементом маршрутизатора MPLS-мережі є планувальник. Його математична модель представлена у другому розділі роботи. На основі цієї моделі запропоновано метод оцінки розміру буферів черг MPLS-маршрутизатора, який дозволяє підвищити точність оцінок міжкінцевих затримок передачі трафіка.

Принцип реалізації цього методу показано на роботі моделі планувальника з трьома чергами та гібридною дисципліною обслуговування. Дискретно-подієвий граф даної моделі наведено на рис.3.



$t_1$  - моменти часу надходження пакетів до пріоритетної черги  
 $t_4, t_7$  - моменти часу надходження пакетів до 2 та 3-ої черг відповідно;  
 $t_2, t_5, t_8$  - моменти часу надходження пакетів до буферів 1, 2, та 3-ої черг відповідно;  
 $t_3, t_6, t_9$  - моменти часу вивільнення 1, 2, та 3 черг відповідно;  
 $N_1, N_2$  - ємність буферів 2 та 3 черг;  
 $q_1, q_2, q_3$  - час, за який пакети надходять до 1, 2, и 3-ої черг відповідно;  
 $e_1, e_2, e_3$  - час обслуговування пакетів 1, 2, та 3-ої черг відповідно;  
 $u_i$  - управляючі впливи

Рис. 4. Часово-подієвий граф роботи планувальника з гібридним обслуговуванням черг з декількома переходами, що управляються

Для нього було складено рівняння спрацьовування переходів, які після опрацювання можна звести до наступного рівняння у просторі станів:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x}(k) \oplus \mathbf{B}_0 \cdot \mathbf{u}(k) \oplus \mathbf{B}_1 \cdot \mathbf{u}_1(k). \quad (16)$$

Для аналізу адекватності моделі, що надана, отримано діаграму Гантта (див. рис.4), що відображає моменти часу надходження пакетів до кожної з черг планувальника та їх звільнення. Це дозволяє формалізувати метод оцінки розміру буфера до рішення рівняння:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{W} \oplus \mathbf{B}_1 \cdot \mathbf{u}_1(k). \quad (17)$$

Розв'язуючи це рівняння відносно  $\mathbf{W}$ , можна отримати:

– точну оцінку розміру буфера, якщо  $\mathbf{W} < \mathbf{x}(k+1)$ , то  $\mathbf{B}_1 \cdot \mathbf{u}_1(k) = \mathbf{x}(k+1)$ ;

$$\mathbf{u}_1(k) = \mathbf{B}_1^{-T} \cdot \mathbf{x}(k+1); \quad (18)$$

– грубу оцінку, якщо  $\mathbf{W} = \tilde{\mathbf{x}}(k+1)$ , то  $\mathbf{B}_1 \cdot \mathbf{u}_1(k) \leq \mathbf{x}(k+1)$ ; вектор оцінок розміру буферів обчислюється згідно з (18). Обмеження по якості обслуговування враховані в модель векторами  $\mathbf{e}$  та  $\mathbf{q}$ .

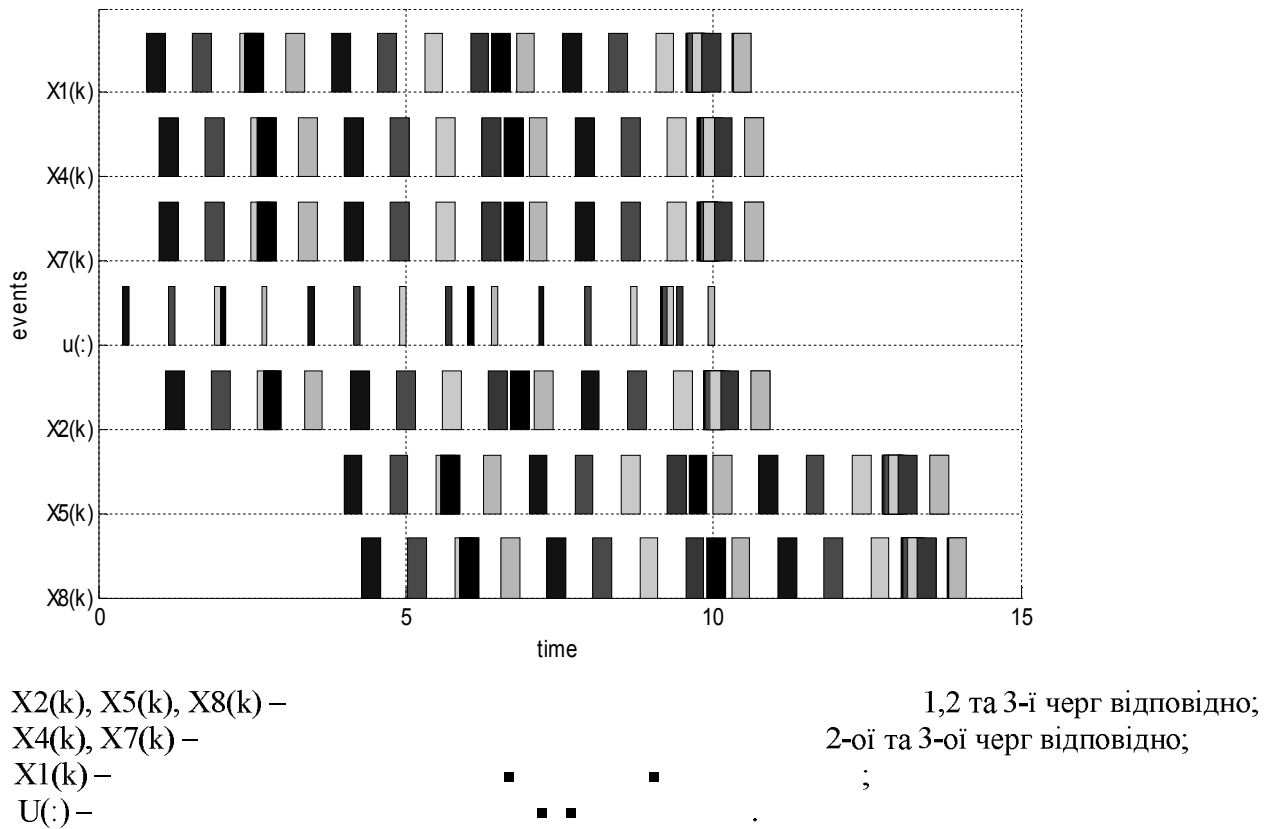


Рис.5. Діаграма Гантта процесу роботи планувальника з гібридним обслуговуванням 3-х черг

Для дослідження запропонованої моделі використано ті ж самі експериментальні дані, що й для методу оцінки пропускної здатності ТЕ-тунелю, що встановлюється. Згідно з (18) зроблено оцінку розміру буферів для черг планувальника для трафіка, що надходить, але за умов забезпечення необхідної якості обслуговування. Зроблено оцінку якості та ефективності роботи запропонованих моделей. Отримані результати наведено на рис. 5. Згідно з проведеним моделюванням розроблені методи дозволяють покращити ефективність використання каналного ресурсу на 7 – 10% з забезпеченням гарантованих показників якості обслуговування для потоку трафіка, що надходить.

В четвертому розділі розроблено імітаційні моделі процесу встановлення ТЕ-тунелю та процесу управління пропускною здатністю ТЕ-тунелю, що реалізують розроблені в роботі методи. Проведено модельні експерименти з використанням пакета аналітичного моделювання (MatLab v.8.0.0.783).

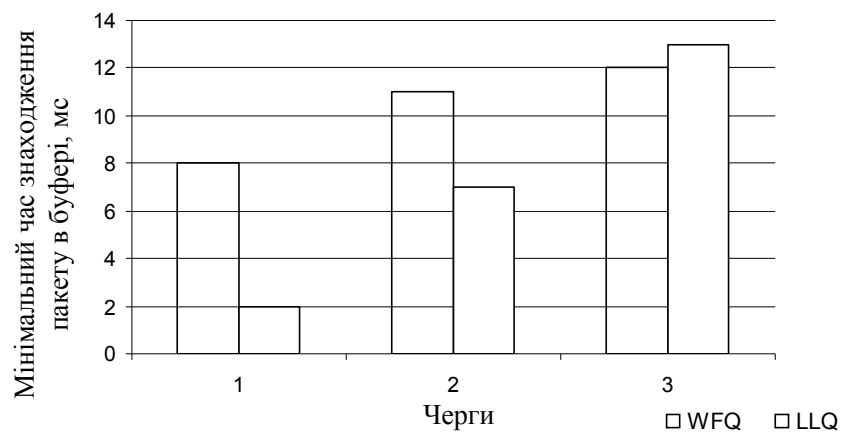


Рис. 6. Мінімальний час знаходження пакета в буфері (черга 1 в LLQ пріоритетна)

Адекватність розроблених моделей управління трафіком забезпечується коректним застосуванням математичного апарату та використанням реальних вхідних даних. Проведено оцінку ефективності запропонованих методів шляхом дослідження наступних імітаційних моделей: моделі прокладення шляху для TE-тунелю; моделі роботи планувальника пакетів компанії Cisco; моделі, що реалізує запропонований метод управління трафіком. Доведено, що розроблені методи дозволяють підвищити ефективність використання мережних ресурсів на 10 – 13% в залежності від типу трафіка, який ним буде передано, при забезпеченні показників якості обслуговування.

В розділі також надано рекомендації щодо впровадження розроблених методів в програмне забезпечення MPLS-мереж та SDN-рішень.

## ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

В дисертаційній роботі розв’язано *актуальну науково-прикладну задачу* – розробку та вдосконалення моделей та методів управління трафіком в MPLS мережах за умови реалізації стратегії встановлення та підтримки TE-тунелів для мультисервісного трафіка. Реалізація запропонованих в роботі рішень сприяє підвищенню ефективності використання мережних ресурсів при забезпеченні необхідних показників якості обслуговування мультисервісного трафіку. За результатами рішення поставленої прикладної задачі можна зробити ряд важливих висновків.

1. У ході проведеного аналізу встановлено, що впроваджені в MPLS комплекси для забезпечення гарантованої якості обслуговування трафіка, що надходить, мають низку функціональних обмежень. Це пов’язано з недосконалістю математичних моделей та методів, на яких оснований протоколи маршрутизації, механізми планування обслуговування черг, методи оцінки пропускну здатності для TE-тунелів.

2. Отримав подальший розвиток метод маршрутизації «від джерела» з підтримкою якості обслуговування для MPLS-мереж. Новизна методу полягає в формуванні композитних маршрутних метрик, які розраховуються на основі функцій «кориснос-



ті» трафіка різних телекомунікаційних послуг, що дозволило формувати ТЕ-тунелі відповідно до характеристик трафіка, який ними буде передано.

3. Вперше розроблено метод оцінки пропускної здатності віртуальних каналів телекомунікаційної мережі, який відрізняється від існуючих використанням прогностичної ARFIMA-моделі, що враховує фрактальні властивості трафіка. Це дозволило зменшити обсяг використаного каналного ресурсу із забезпеченням заданих параметрів обслуговування.

4. Вперше розроблено дискретно-подієву модель роботи планувальника прикордонного мережного пристрою в базисі Max-Plus алгебри, яка враховує затримки на обробку пакетів та дозволяє формалізувати процес управління чергами пакетів в просторі станів. На основі розробленої моделі запропоновано метод оцінки розміру буферів черг MPLS-маршрутизатора, який дозволяє підвищити точність оцінок міжкінцевих затримок передачі трафіка.

5. Дисертаційна робота виконана згідно з положеннями Державної програми розвитку «Основні наукові напрямки та найважливіші проблеми фундаментальних досліджень в галузі природних, технічних та гуманітарних наук на 2009-2013 рр» пункт 1.2.5.2 «Науково-технічне забезпечення процесів конвергенції в телекомунікаційних мережах», що затверджена наказом МОН України, Національною Академією Наук України від 26.11.09 № 1066/609. Дисертаційна робота є складовою частиною науково-дослідницької роботи Н-03-11 «Дослідження і розробка методів проектування та підвищення технічної ефективності цифрових систем управління, інформаційно-вимірювальних систем і телекомунікацій» та ДР № 0111U001424 «Розробка теорії синтезу дискретно-безперервних систем автоматичного керування технологічними об'єктами» в яких дисертант була виконавцем.

6. Запропоновані в дисертації математичні моделі та метод призначені для розв'язання важливих прикладних задач щодо управління трафіком в транспортних MPLS-мережах: при балансуванні навантаження в приграничних мережних пристроях, при визначенні обсягу пропускної здатності для ТЕ-тунелів, що встановлюються, та їхньої маршрутизації з підтримкою якості обслуговування. Реалізація на практиці отриманих рішень дозволить покращити ефективність використання мережних ресурсів із забезпеченням основних показників якості обслуговування. Зокрема, зменшується обсяг використаного каналного ресурсу при встановленні ТЕ-тунелю на 10 – 13%, в залежності від типу трафіка, який ним передається.

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

1. Лозинская В.Н. Способ описания процессов в телекоммуникационных сетях с использованием аппарата Max-plus алгебра / В.Н. Лозинская //Збірник наукових

праць Донецького інституту залізничного транспорту. – Донецьк, 2013. – Вип. 33. – С. 92 - 96.

2. Лозинская В.Н. Математические модели компонентов телекоммуникационных систем / В.Н. Лозинская // Наукові праці Донецького національного технічного університету: збірник наукових праць. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. – Донецьк, ДонНТУ, 2013. – Вип. 1 (24). – С. 121-126

3. В.І. Бессараб. Аналіз частотних характеристик дискретнобезперервних систем при застосуванні критичного графа динаміки/ В.І. Бессараб, А.О. Воропаєва, В.М. Лозинська// Наукові праці Донецького національного технічного університету: збірник наукових праць.– Донецьк: ДонНТУ, 2011. – Вип. 20(182). – С 96-101.

4. Дегтяренко И.В. Динамические модели средств управления трафиком в сетевом узле / И.В. Дегтяренко, В.Н. Лозинская // Наукові праці Донецького національного технічного університету: збірник наукових праць. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. – Донецьк, ДонНТУ, 2014. – Вип. 1 (26). – С. 83-95.

5. Дегтяренко І.В. Застосування апарату ідемпотентної алгебри та функцій «корисності» для вирішення задачі QoS маршрутизації / І.В. Дегтяренко, В.М. Лозинська // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: УкрДА-ЗТ, 2014. – Вип. 2 (105). – С. 3-7.

6. Бессараб В.И. Методика синтеза алгоритма управления для дискретно-непрерывных объектов / В.И. Бессараб, Е.Г. Коваленко, В.М. Лозинская // Автоматика 2008: збірник наукових статей XV міжнародної конференції з автоматичного управління, 23-26 вересня 2008 р. – Одеса: ОНМА, 2008. – С. 50 – 53.

7. Лозинская В.Н. Моделирование процес сов в транспортных телекоммуникационных сетях с оптической берстной коммутацией / В.Н. Лозинская // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании '2011».– Одесса: Черноморье, 2011. – Выпуск 4. Том 9. – С. 13-18

8. Дегтяренко И.В. Использование комплексного критерия качественного обслуживания при управлении мультисервисным трафиком / И.В. Дегтяренко, В.Н. Лозинская // Тези доповідей науково-методичної конференції «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2012» / Львівська політехніка. – Львів., 2012. – С. 121 – 123.

9. Дегтяренко И.В. Использование аппарата дискретно-непрерывных алгебр для описания механизмов работы оптического коммутатора / И.В. Дегтяренко, В.Н. Лозинская // Тезисы докладов 22-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2012) / СевНТУ. – Севастополь, 2012. – Т.1 – С.405-407.

10. Дегтяренко И.В. Оптимизация параметров канала передачи данных для сетей с QoS-маршрутизацией / И.В. Дегтяренко, В.Н. Лозинская, Е.Г. Игнатенко // Тези доповідей 11-ої міжнародної наукової конференції «Контроль і управління в складних системах» (КУСС-2012) / ВНТУ. – Вінниця, 2012. – С.55-56.

11. Лозинская В.Н. Алгоритм динамического управления пропускной способностью LSP / В.Н. Лозинская, И.В. Дегтяренко // Тезисы докладов 23-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2013) / СевНТУ. – Севастополь, 2013. – Т.1 – С. 504. - ISBN : 978-966-335-399-9.

## АНОТАЦІЯ

**Лозинська Вікторія Миколаївна. Метод управління трафіком в процесі встановлення TE-тунелів із використанням лінійних Max-plus моделей.** – Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі. Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2014.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуальної наукової задачі, пов'язаної зі вдосконаленням моделей та методів управління трафіком в MPLS-мережах в умовах реалізації стратегій QoS-маршрутизації та методів оцінки параметрів TE-тунелів шляхом розробки відповідних математичних моделей для підвищення ефективності використання мережних ресурсів в цілому.

У ході проведеного аналізу встановлено, що впроваджені в MPLS комплекси для забезпечення гарантованої якості обслуговування трафіка, що надходить, мають низку функціональних обмежень, що пов'язано з недосконалістю математичних моделей та методів, на яких вони основанийі.

Отримав подальший розвиток метод маршрутизації «від джерела» з підтримкою якості обслуговування для MPLS-мереж. Новизна методу полягає в формуванні композитних маршрутних метрик, які розраховуються на основі функцій «корисності» трафіка різних телекомунікаційних послуг, що дозволило формувати TE-тунелі відповідно до характеристик трафіка, який ними буде передано.

Вперше розроблено метод оцінки пропускної здатності віртуальних каналів телекомунікаційної мережі, який відрізняється від існуючих використанням прогностичної ARFIMA-моделі, що враховує фрактальні властивості трафіка. Це дозволило зменшити обсяг використаного каналного ресурсу із забезпеченням заданих параметрів обслуговування в середньому на 18%.

Вперше розроблено дискретно-подієву модель роботи планувальника приграничного мережного пристрою в базисі Max-Plus алгебри, яка враховує затримки на обробку пакетів та дозволяє формалізувати процес управління чергами

пакетів в просторі станів. На основі розробленої моделі запропоновано метод оцінки розміру буферів черг MPLS-маршрутизатора, який дозволяє підвищити точність оцінок міжкінцевих затримок передачі трафіка.

Запропоновані математичні моделі та метод можуть бути покладені в основу відповідних протокольних рішень під час розв'язання задач управління трафіком в транспортних MPLS-мережах, при балансуванні навантаження в приграничних мережних пристроях, при визначенні обсягу пропускної здатності для TE-тунелів, що встановлюються, та їхньої маршрутизації з підтримкою якості обслуговування.

**Ключові слова:** трафік, мережа, управління, маршрутизація з підтримкою якості обслуговування, планувальник пакетів, дискретно-подієва модель, пропускна здатність, лінійна Max-plus модель.

## АННОТАЦІЯ

**Лозинская Виктория Николаевна. Метод управления трафиком в процессе установления TE-туннелей с использованием линейных Max-plus моделей** – Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.02 – телекоммуникационные системы и сети. Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2014.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научной задачи, связанной с усовершенствованием моделей и методов управления трафиком в MPLS сетях в условиях реализации стратегий QoS-маршрутизации и методов оценки параметров TE-туннелей путем разработки соответствующих математических моделей для повышения эффективности использования сетевых ресурсов в целом.

Разработаны математические модели основных этапов процесса установления TE-туннеля: оценка пропускной способности устанавливаемого TE-туннеля, составления маршрутных метрик для его маршрутизации и планирования обслуживания очередей пограничных маршрутизаторов с целью обеспечения гарантированных параметров качества обслуживания. Разработанные модели являются основой метода управления трафиком в процессе установления TE-туннелей. Практическая ценность метода заключается в увеличении эффективности использования сетевых ресурсов с обеспечением необходимого качества обслуживания. Предложенные математические модели и методы могут быть положены в основу соответствующих протокольных решений по выполнению задач управления трафиком транспортных MPLS-сетей: для балансировки нагрузки в пограничных маршрутизаторах, для определения пропускной способности устанавливаемых TE-туннелей, а также их маршрутизации с обеспечением качества обслуживания.

**ABSTRACT**

**Viktoriya N. Lozinskaya Traffic management method in TE-tunnels setting process with linear MAX-plus models.** – Manuscript. Dissertation for candidate's degree of technical in a specialty 05.12.02 – telecommunication systems and network. – Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, 2014.

Dissertation is devoted to actual scientific task solving. It is connected with traffic management models and methods in MPLS-network improvement under the implementation of the QoS-routing strategy and TE-tunnel's parameters estimation method conditions by right mathematical models designing on purpose of more efficient network resources using in generally.

Main parts of TE-tunnel's setting process mathematical models are designed. They are TE-tunnel's setting bandwidth estimation, route metrics forming for its routing and queue service planning for guarantee quality of service in border routers. The results novelty is in more efficient network resources using with guarantee quality of service assurance by decreasing channel resource capacity in virtual channel's setting process. Proposed mathematical models and method can be the basis of right protocols in which are MPLS-network's management traffic tasks solving. They can be used for load balancing in border routers, TE-tunnels' setting bandwidth rate and its routings with guarantee quality of service.

Підп. до друку. 25.12.14  
Умов. друк. арк. 0,9

Формат 60x84 1/16  
Тираж 100 прим.

Спосіб друку – ризографія  
Ціна договірна.

---

ХНУРЕ, 61166, Харків, просп. Леніна, 14

---