

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Більшість задач побудови телекомунікаційних систем (ТКС) з позиції системного підходу розв'язується в межах відповідної теорії ТКС, яка інтенсивно розвивається останнім часом. В Україні найбільш вагомий внесок у становлення та розвиток теорії ТКС вніс проф. В.В. Поповський. При цьому важливою складовою даної теорії є теорія управління трафіком, основоположниками якої по праву можна вважати таких вчених як L. Kleinrock, R. Gallager, L.R. Ford, D.R. Fulkerson, Г.П. Захаров та ін. Також вагомий внесок у вивчення теоретичних і практичних питань управління трафіком внесли закордонні вчені, серед яких K. Nahrstedt, S. Floyd, H. Zhang, L. Zhang, J. Crowcroft, A. Orda, J.J. Garcia-Luna-Aceves, R. Guerin, David D. Clark, Shenker S., Jacobson V. та ін., а також вчені України та близького зарубіжжя: Л.Н. Беркман, В.М. Вишневський, Я.С. Димарський, М.В. Захарченко, М.М. Климаш, О.В. Лемешко, А.Г. Ложковський, Ю.І. Лосєв, А.Н. Назаров, С.І. Приходько, О.А. Серков, В.К. Стеклов, Г.Г. Яновський та ін.

Традиційні технології аналізу, оцінки ефективності функціонування ТКС і розв'язання задач управління їх ресурсами базуються на використанні математичних моделей систем масового обслуговування (СМО). При цьому найбільш істотні результати теорії масового обслуговування (ТМО) пов'язані з використанням марківських моделей випадкового процесу, який описує вхідний потік, а також процеси обслуговування та очікування. Ці методи можуть бути успішно застосовані у припущенні про пуасонівський характер вхідного потоку.

Однак класична пуасонівська модель трафіка, яка використовувалася при проектуванні мережних протоколів, не враховує той факт, що реальний мережний трафік не є пуасонівським. На практиці вхідний потік і процес обслуговування не є марківськими. Тому виникає протиріччя між існуючими моделями трафіка, які використовують при проектуванні мережних протоколів та прогнозуванні трафіка, та сучасними реальними вхідними потоками та процесами, які не відповідають потребам щодо простіших пуасонівських потоків.

Одним зі способів аналізу немарківських систем є їх апроксимація за допомогою марківських систем. У зв'язку із цим у роботі ставиться та вирішується проблема виявлення залежностей, що встановлюють зв'язок між параметрами щільностей розподілів інтервалів між пакетами, та тривалостей обслуговування, з одного боку, і параметрами марківської апроксимації, з іншого. При цьому розподіл імовірностей станів марківської моделі в значенні найменших квадратів максимально близький до розподілу реальної системи. У свою чергу апроксимація реального потоку розподілом Ерланга належного порядку дозволить здійснити перехід до марківської системи та використовувати математичний апарат ТМО.

Засобами стандартних марківських моделей ТМО вирішені повністю задачі аналізу одно- та багатоканальних систем, до входу яких надходить однорідний потік пакетів або суперпозиція потоків без пріоритетів. Однак у задачах із пріоритетами повні результати відомі тільки у випадку, коли сумарний неоднорідний потік надходить до одноканальної системи. Труднощі розв'язання цієї задачі для багатоканальної системи з неоднорідним потоком визначаються швидким ростом її

розмірності. Так, для звичайних, ординарних потоків на вході та числа каналів системи розмірність задачі досягає десятків або сотень тисяч. Тому єдиний ефективний шлях розв'язання таких задач полягає у використанні методу фазового укрупнення станів, суть якого полягає в декомпозиційному підході.

Можливість марківської апроксимації немарківських систем і технологія фазового укрупнення їх станів дають підстави ставити та вирішувати задачі підвищення ефективності передачі даних у вузлах телекомунікаційних мереж шляхом раціонального управління їх ресурсами з урахуванням відмінностей у пріоритетах різних вхідних потоків. У роботі під ресурсами вузла телекомунікаційної мережі розуміється доля часу процесора, яка витрачається на передачу пакетів конкретного потоку, у циклі обслуговування інтегрального потоку даних. Таким чином, система управління ресурсом процесора вузла мережі має можливість змінювати інтенсивності обслуговування для пакетів із різних вхідних потоків з метою раціональної відповідності між рівнем пріоритету пакетів і середньою довжиною черги для них. При цьому задача управління не є тривіальною через високу розмірність системи.

Таким чином, актуальною є **науково-технічна проблема** – розвиток теоретичної бази засобів аналізу немарківського трафіка, методів розрахунку показників якості обслуговування (QoS) у вузлах телекомунікаційних мереж в умовах немарківського трафіка за рахунок побудови багаторозмірних математичних моделей із великою кількістю станів та потоками з пріоритетами.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дослідження в дисертаційній роботі проводилися у відповідності з наступними нормативними актами: Концепцією Національної Програми інформатизації, схваленою Законом України "Про Концепцію Національної програми інформатизації" від 04.02.1998 р. № 75\98 – ВР (зі змінами 2000 – 2014 рр.), Законом України «Про телекомунікації» від 18.11.2003 № 1280-IV.

Дослідження проводилися в рамках держбюджетних тем НДР МОН України: «Розробка математичних моделей і методів розв'язання задач керування виробництвом у нечітких умовах» (ДР № 0106U005166); «Дослідження способів створення інтерактивного інформаційного середовища для української науково-освітньої мережі URAN» (ДР № 0110U001249); «Розвиток теорії обробки інформації та ідентифікація об'єктів у єдиній інформаційній мережі систем спостереження» (ДР № 0110U001250); у госпрозрахункових НДР: «Мережний програмний комплекс обліку медичної статистики обласної студентської лікарні «ОСБ-МедСтат» (регіональна Комплексна програма поліпшення медичної допомоги студентам вищих навчальних закладів Харківської області, затверджена рішенням XXXIV сесії IV скликання Харківської обласної ради від 23 грудня 2005 року); «Мережний програмний комплекс медичного центру ВНЗ «МедПункт» (Харківська міська студентська лікарня, м. Харків); «Мережний програмний комплекс стаціонару дитячої лікарні «Стационар ОДКБ» (Обласна дитяча клінічна лікарня, м. Харків); мережний програмний комплекс «Електронний медичний паспорт студента» (Харківська міська студентська лікарня, Національний технічний університет «ХПІ», Національний аерокосмічний університет «ХАІ», Харківський Національний

автомобільно-дорожній університет, Українська інженерно-педагогічна академія, Харківська гуманітарно-педагогічна академія, всі м. Харків).

Мета і задачі дослідження. Метою дисертації є розробка математичних моделей вузлів мереж і моделей трафіка, які базуються на марківських апроксимаціях процесу функціонування немарківських систем обслуговування для розв'язання задач аналізу систем та управління чергами у вузлах мереж за сукупністю критеріїв, які покращують показники QoS (затримка пакета у вузлі, рівень втрат пакетів).

Досягнення цієї мети вимагає на основі системного підходу постановку і розв'язання таких основних задач розробки:

- методу розщеплення неоднорідного потоку пакетів на складові, який дозволить явно віднести кожний пакет даних до одного із потоків;
- методу марківської апроксимації опису немарківського трафіка;
- методу побудови марківських моделей, які враховують неординарність процесів надходження пакетів на обслуговування у вузлах мереж;
- методів розв'язання задач аналізу моделей вузлів мереж, які мають високу розмірність, що виникає в результаті того, що до входу вузла мережі одночасно надходить велика кількість потоків пакетів різної інтенсивності, довжини та пріоритету;
- моделей функціонування вузлів мереж, які враховують відмінності у пріоритетах одних потоків пакетів перед іншими;
- методів управління обслуговуванням черг пакетів у вузлах телекомунікаційних мереж за сукупністю критеріїв, які підвищують показники QoS: продуктивність і надійність.

Об'єктом дослідження є процеси функціонування вузлів мереж в умовах немарківського трафіка та управління обслуговуванням черг.

Предметом дослідження є математичні моделі вузлів мереж, математичні моделі трафіка у вузлах мереж, методи марківської апроксимації опису немарківського трафіка та методи управління чергами.

Методи дослідження. У роботі розглядаються задачі, методи та засоби математичного моделювання мережного трафіка та вузлів мереж. Для цього використані наступні методи досліджень: теорія випадкових процесів для розробки математичної моделі нестационарного, неординарного самоподібного випадкового трафіка з післядією, який надходить до входу вузла мережі; методи математичної статистики для розробки процедури розщеплення композиційного вхідного потоку на складові; теорія ймовірностей для розробки марківських апроксимацій немарківського вхідного потоку, а також методи динамічного програмування для побудови декомпозиційної процедури групування станів марківського ланцюга; теорія оцінювання та імітаційне моделювання вузлів мережі та трафіка для аналізу впливу самоподібного трафіка на вузол мережі; методи математичного програмування та теорії масового обслуговування для розв'язання задач управління

обслуговуванням черг і раціонального розподілу долі ресурсу вузла мережі, який використовується на обслуговування черг, між потоками пакетів.

Наукова новизна отриманих результатів. Наукова новизна роботи полягає в постановці та розв'язанні актуальної науково-технічної проблеми розвитку теоретичної бази засобів аналізу немарківського трафіка, методів розрахунку показників якості обслуговування (QoS) вузлів телекомунікаційних мереж в умовах немарківського трафіка за рахунок побудови багаторозмірних математичних моделей із великою кількістю станів та потоками з пріоритетами. Наукова новизна полягає також у створенні програмно-технічних засобів управління обслуговуванням черг за сукупністю критеріїв із метою підвищення надійності (рівень втрат пакетів) і продуктивності (час затримки пакета у черзі).

Загальний науковий результат роботи – метод побудови марківських апроксимацій реальних систем обслуговування, який дозволяє розв'язувати проблеми оцінки їх ефективності із прийнятною точністю. Наукова новизна визначається наступними положеннями:

1. *Отримав подальший розвиток* метод розщеплення неоднорідного потоку пакетів на складові, який представляє вхідний потік у вигляді суперпозиції набору однорідних потоків із відомими розподілами, що дозволяє будувати багатовимірні моделі вузлів мереж із неоднорідним трафіком, які виконують більш точну оцінку характеристик якості обслуговування.

2. *Вперше* запропоновано метод побудови адекватної марківської моделі немарківського трафіка із використанням потоку Ерланга належного порядку, який вкладено до пуасонівського потоку, що дозволило підвищити точність оцінювання характеристик вузла мережі математичним апаратом марківських систем масового обслуговування.

3. *Вперше* розроблено метод обчислення розподілу ймовірностей станів марківського ланцюга для моделі вузла мережі, на вхід якого по багатоканальній лінії зв'язку поступає груповий неординарний вхідний потік із довільним розподілом кількості пакетів у групі. Метод дозволяє більш повно враховувати технологічні аспекти функціонування вузлів мереж.

4. *Вперше* для багатовимірних моделей мережного трафіка розроблено метод фазового укрупнення станів напівмарківської системи, який дозволяє, на відміну від відомих, здійснити розрахунок розподілу ймовірностей станів системи високої розмірності.

5. *Одержали подальший розвиток* методи розрахунку показників якості обслуговування у телекомунікаційних мережах в умовах неоднорідного трафіка за рахунок врахування абсолютного та відносного пріоритетів пакетів у багатоканальних вузлах ТКС. Запропоновано марківські моделі одно- та багатоканальних вузлів мереж із неоднорідним трафіком з абсолютним і відносним пріоритетами пакетів, які обчислюють ймовірності усіх станів системи, що дозволяє отримувати показники QoS (затримка пакету, втрати пакетів).

6. *Одержали подальший розвиток* методи обслуговування черг таких, що настроюються, які, на відміну від відомих, установлюють раціональний розподіл ресурсу системи обробки даних за критеріями: середня довжина черг із урахуванням

пріоритетів – знижує ймовірність відкидання пакетів алгоритмом RED по всіх потоках; середня тривалість очікування початку обслуговування – поліпшує пропускну здатність вузла мережі; ймовірність того, що довжина максимальної із черг не перевершить критичну – урівноважує відкидання пакетів алгоритмом RED між усіма потоками, знижує коливання черг; середня кількість черг, довжина яких не нижче критичної – урівноважує відгук для усіх користувачів.

Практичне значення отриманих результатів.

Наукові положення, висновки і рекомендації, сформульовані автором у дисертації, мають практичне значення, яке полягає у створенні інструментальних засобів у вигляді конкретних програм, що базуються на результатах досліджень, побудованих у роботі математичних моделей трафіка та вузлів ТКС, методів і технологій управління обслуговуванням черг в умовах немарківського трафіка.

Практичне значення дисертаційної роботи також підтверджується результатами її впровадження.

Практична апробація розроблених моделей і програмно-технічних засобів у ТОВ телерадіокомпанії «Епсілон ТБ»: філія Triolan, м. Харків (Акт впровадження від 14.07.2011); ВАТ «Турбоатом», м. Харків (Акт впровадження від 09.06.2011); Національному аерокосмічному університеті «ХАІ», м. Харків (Акт впровадження від 21.06.2011, АС №36636 від 21.01.2011); Харківському Національному автомобільно-дорожньому університеті, м. Харків (Акт впровадження від 22.06.2011, АС №36636 від 21.01.2011); Українській інженерно-педагогічній академії, м. Харків (Акт впровадження від 23.06.2011, АС №36636 від 21.01.2011); Харківській гуманітарно-педагогічній академії, м. Харків (Акт впровадження від 23.06.2011, АС №36636 від 21.01.2011); Харківській міській студентській лікарні, м. Харків (Акт впровадження від 17.05.2012, АС №36461 від 10.01.2011, АС №43502 від 27.04.2012, АС №43500 від 27.04.2012); обласній дитячій клінічній лікарні №1, м. Харків (Акт впровадження від 07.03.2011, АС №36820 від 07.02.2011); у Центрі нових інформаційних технологій Національного технічного університету «ХПІ», м. Харків, показала їх високу ефективність. У середньому надійність (рівень втрат пакетів) передачі даних у вузлах мережі було підвищено на 7%, а продуктивність (час очікування обслуговування пакетів) – на 5%.

Розроблені теоретичні моделі та методи аналізу немарківського трафіка у вузлах телекомунікаційних мереж використовуються в навчальному процесі кафедри систем інформації НТУ «ХПІ» у курсах «Транспортні інформаційно-керуючі системи», «Інформаційна логістика», «Адміністрування комп'ютерних мереж», «Дослідження операцій» для спеціальностей: «Телекомунікаційні системи та мережі», «Системи штучного інтелекту» (Акт впровадження від 06.09.2011, АС №39374 від 26.07.2011).

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати теоретичних і практичних досліджень, представлених в дисертаційній роботі, одержані автором особисто та повністю опубліковані в спеціалізованій літературі [1-55].

У роботах, виконаних у співавторстві, особисто автору належать наступні наукові результати: в [1] розроблено модель вузла мережі із суперпозицією потоків з різними пріоритетами на вході; в [2] розроблено технологію визначення параметрів

вкладено марківського ланцюга у напівмарківський процес; в [3] здійснено аналіз стратегії укрупнення станів марківського ланцюга в процедурі фазової декомпозиції і вироблено рекомендації з укрупнення; в [4] отримано аналітичні викладки для обчислення ймовірностей переходів у групованому марківському ланцюгу; в [5] розроблено метод аналізу асимптотичної поведінки напівмарківського процесу; в [6] побудовано модель вузла мережі у вигляді марківської системи масового обслуговування; в [7] отримано аналітичні співвідношення для розрахунку розподілів ймовірностей станів моделі системи з потоком групових пакетів; в [8] побудовано модель регресії залежності параметра розподілу Ерланга від параметрів універсального трипараметричного розподілу; в [10] отримано співвідношення для розрахунку ймовірності втрати пакета при навантаженні, що задано; в [11] побудовано модель вузла мережі з нестационарними довжинами черг у вузлах мережі; в [12] отримано співвідношення для розрахунків безумовної ймовірності безвідмовності моделі вузла мережі при випадковій тривалості пікового навантаження; в [13] побудовано модель стохастичного трафіка та розроблено метод управління, який мінімізує максимальну довжину черги у вузлі мережі; в [14] розроблено метод розщеплення неоднорідного потоку пакетів у вузлі мережі; в [15] розроблено процедуру визначення оптимального маршруту за критерієм «ймовірність доставки пакета за необхідний час»; в [16] розроблено технологію передачі сукупності пакетів за мінімаксімним критерієм; в [17] отримано співвідношення для раціонального розподілу ресурсів процесора маршрутизатора між чергами різних потоків за заданими критеріями; в [18] розроблено метод розрахунків початкової матриці ймовірностей переходів марківського ланцюга, що управляється; в [19] розроблено метод формування послідовності передачі пакетів, який мінімізує сумарну затримку; в [20] розроблено процедуру формування послідовностей пакетів із заданим параметром Херста; в [35] проведено випробування розробленого програмно-технічного засобу діагностики навантаження на проксі-сервері; в [37] запропоновано ітераційну процедуру, яка заснована на технології фазового укрупнення станів системи; в [38] розроблено метод оптимізації порядку передачі повідомлень та імітаційну модель маршрутизатора; в [42] поліпшено метод фазового укрупнення станів марківського ланцюга; в [43] розроблено метод обчислення оптимального розподілу ресурсу процесора маршрутизатора; у [44] розроблено метод апроксимації реального потоку потоком Ерланга шляхом просіювання пуасонівського потоку.

Апробація результатів дисертації.

Основні результати роботи доповідались на: Міждержавній науково-методичній конференції «Проблеми математичного моделювання» (Дніпродзержинськ, 2005); Міжнародних науково-технічних конференціях «Гарантоспроможні системи, сервіси та технології» - DESSERT (Полтава, 2006, Кіровоград, 2007); Міжнародній науково-практичній конференції «Інтелектуальні системи прийняття рішень та інформаційні технології» (Чернівці, 2006); п'ятій, шостій, восьмій, одинадцятій, дванадцятій Міжнародних науково-технічних конференціях «Проблеми інформатики і моделювання» (Харків, 2005; Харків, 2006; Харків, 2008; Ялта, 2011; Ялта, 2012); науково-практичній конференції «Сучасні

проблеми телекомунікацій» (Львів, 2010); науковій конференції «Інформаційні технології в управлінні складними системами» (Дніпропетровськ, 2011); XIV, XV, XIX, XX міжнародних науково-практичних конференціях «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» Місгосад (Харків, 2006; Харків, 2007; Харків, 2011; Харків, 2012); Міжнародній науковій конференції "Наукова періодика слов'янських країн в умовах глобалізації" (Харків, 2012); III Міжнародній науково-практичній конференції «Системний аналіз. Інформатика. Управління» САІУ (Запоріжжя, 2012); 8-й Міжнародній молодіжній науково-технічній конференції «Сучасні проблеми радіотехніки та телекомунікацій» РТ-2012 (Севастополь, 2012); Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні системи та технології» АІСТ (Суми, 2012); 16-му Міжнародному молодіжному форумі «Радіоелектроніка і молодь у XXI сторіччі» (Харків, 2012); Xith International Conference «Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science» TCSET (Lviv, 2012); 14-й Міжнародній науково-технічній конференції «Системний аналіз та інформаційні технології» SAIT (Київ, 2012).

Публікації. Результати дослідження опубліковано у 55 працях, серед яких 38 статей у спеціалізованих наукових виданнях України [1-38]; 3 свідоцтва про авторське право на твір [39-41]; 14 матеріалів і тез доповідей [42-55]. Публікації [26, 28, 32, 36] увійшли до індексу наукового цитування Російської Федерації, публікації [37, 54] увійшли до бази наукового цитування Scopus.

Структура та об'єм дисертації. Дисертація складається із вступу, п'яти розділів основної частини, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний об'єм друкованого тексту становить 385 сторінок, з них: 275 сторінок основного тексту, 58 рисунків і 11 таблиць по тексту, 20 рисунків і 6 таблиць на окремих 15 сторінках, список використаних джерел містить 297 найменувань на 26 сторінках, 6 додатків на 84 сторінках. Дисертація написана російською мовою.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано наукову проблему, відображено зв'язок з науковими програмами та темами, визначено мету, об'єкт, предмет досліджень, коло задач, які розв'язуються, сформульовано наукову новизну і практичне значення отриманих результатів.

У **першому розділі** проведено аналіз показників якості, які висунуто до вузлів телекомунікаційних мереж – продуктивність (затримка обслуговування пакетів) і надійність (рівень втрат пакетів).

У розділі виконано огляд існуючих наукових напрямків розв'язання задач забезпечення «якості обслуговування» у телекомунікаційних мережах, дано стислий аналіз математичних методів систем масового обслуговування, теорії графів і аналізу мереж, теорії нечітких множин і нечіткої логіки, тензорного аналізу, теорії фракталів для аналізу мереж. Розглянуто недоліки запропонованих теорій і сформульовано напрямки досліджень, які полягають у розробці теоретичних основ побудови адекватних моделей вузлів телекомунікаційних мереж в умовах немарківського, нестационарного, самоподібного трафіка, розробці методів

управління чергами пакетів, які забезпечують підвищення показників ефективності (втрати пакетів, затримка обслуговування) передачі даних в умовах немарківських потоків, а також створенні та впровадженні програмно-технічних засобів управління трафіком у вузлах маршрутизації ТКС.

У **другому розділі** розглянуто та виявлено властивості реальних потоків у телекомунікаційних мережах. Реальний трафік – нестационарний, неординарний неоднорідний, має післядію, тобто не марківський.

У процесі передачі пакетів виникає довгострокова залежність, яка проявляється в характері розподілів випадкових довжин інтервалів між надходженням пакетів. Випадкова змінна з повільно загасяючим розподілом може мати нескінченні математичне сподівання і дисперсію. Найявністю «важкого хвоста» (рис.1) є основною причиною довгострокової залежності та самоподоби мережного трафіка.

У самоподібних процесів статистичні характеристики (математичне сподівання, дисперсія, кореляційна функція) близькі до відповідних характеристик агрегованого процесу, а так само самоподібний процес інваріантний щодо змін масштабу. Таким чином, для самоподібних процесів виконуються співвідношення

$$M[X(t)] = a^{-H} M[X(at)], \quad D[X(t)] = a^{-2H} D[X(at)], \quad R_x(t,s) = a^{-2H} R_x(at,as),$$

де H - параметр Херста, що задає рівень самоподоби та змінюється на інтервалі $(0.5;1)$; a - масштаб самоподоби.

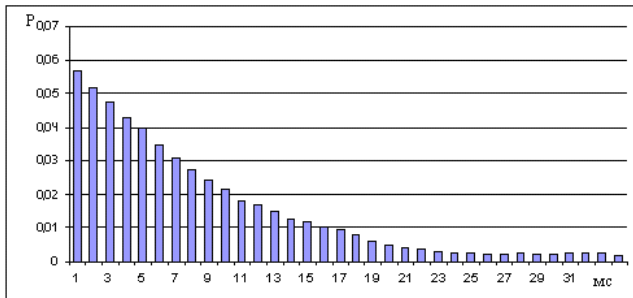


Рис. 1. Розподіл із «важким хвостом» інтервалів між пакетами

Характерною рисою самоподібного процесу є довгострокова залежність процесу від значень на попередніх інтервалах і полягає у більш повільному убутанні автокореляційної функції

$$r_x(\tau) = (1 + \tau)^{-\beta/2}, \quad \beta = 2(1 - H). \quad (1)$$

Для дослідження нестационарного трафіка було запропоновано математичну модель, суть якої полягає в описі залежності інтенсивності вхідного потоку від часу

$$\lambda(t) = \left(b_0 + b_1 \sin \frac{2\pi}{24} t \right) \left(1 + b_2 \sin \frac{2\pi}{144} t \right) = a_0 + a_1 \sin \frac{2\pi}{24} t + a_2 \sin \frac{2\pi}{144} t + a_3 \sin \frac{2\pi}{24} t \sin \frac{2\pi}{144} t. \quad (2)$$

Тут b_0 – середня кількість пакетів, які надходять у систему протягом робочого дня; b_1 – амплітуда добових коливань кількості пакетів, які надходять у систему; b_2

– амплітуда тижневої модуляції амплітуди добових коливань кількості пакетів, що надходять. Параметри a_0 , a_1 , a_2 моделі (2) відшукуються по методу найменших квадратів (МНК), використовуючи дані про реальні спостереження. Перевірка адекватності моделі доводить, що реальний трафік у мережі є нестационарним.

Проведений аналіз гістограм розподілу довжин пакетів, які надішли до мережі НТУ «ХП» у різні за довжиною проміжки часу, показав, що трафік неоднорідний (рис. 2, рис. 3.) та описується двомодальним розподілом.

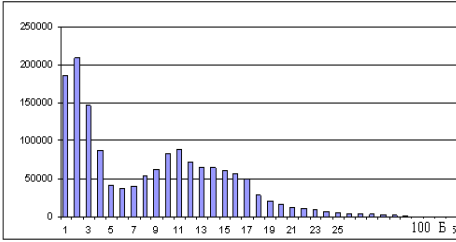


Рис. 2. Гістограми довжин пакетів на інтервалі (11.09.09 – 06.11.09).

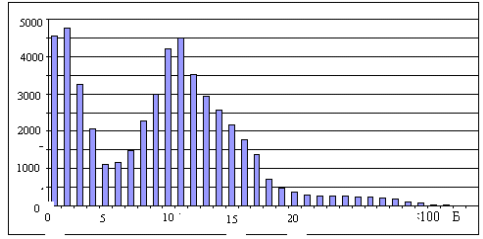


Рис. 3. Гістограми довжин пакетів на інтервалі (8-00-20-00 11.09.09).

З метою дослідження процесу передачі пакетів у вузлі телекомунікаційної мережі в умовах самоподібного вхідного потоку було розроблено імітаційну модель, спроможну подавати до входу потоки різних розподілів. Ключовою особливістю моделі є процедура отримання самоподібного потоку пакетів із заданим параметром H та післядією. Сутність процедури складається у наступному. Інтервал модуляції розбивається на n однакових підінтервалів Δt . Задаючи параметр H , для кожного підінтервалу, використовуючи автокореляційну функцію самоподібного потоку (1), формується кореляційна матриця

$$K = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ k_{n1} & k_{n2} & \dots & k_{nn} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Методом зворотного перетворення отримується n пуасонівських випадкових значень $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ кількості пакетів на підінтервалах, математичне сподівання яких дорівнює a . Корельовані випадкові значення відшукуються із системи

$$\begin{aligned} x_1 &= c_{11}(\xi_1 - a) + a, \\ x_2 &= c_{12}(\xi_1 - a) + c_{22}(\xi_2 - a) + a, \\ &\dots \\ x_n &= c_{1n}(\xi_1 - a) + c_{2n}(\xi_2 - a) + \dots + c_{nn}(\xi_n - a) + a, \end{aligned} \quad (4)$$

а шукані коефіцієнти c отримують із співвідношень

$$\begin{aligned} M[(x_1 - a)^2] &= M[c_{11}(\xi_1 - a)^2] = c_{11}^2 M[(\xi_1 - a)^2] = c_{11}^2 a^2 = k_{11}, \\ M[(x_1 - a)(x_2 - a)] &= M[c_{11}(\xi_1 - a)(c_{12}(\xi_1 - a) + c_{22}(\xi_2 - a))] = k_{12}, \\ &\dots \\ M[(x_i - a)^2] &= M[(c_{1i}(\xi_1 - a) + c_{2i}(\xi_2 - a) + \dots + c_{ii}(\xi_i - a))] = k_{ii}. \end{aligned} \quad (5)$$

До входу імітаційної моделі обслуговування пакетів в різних сеансах імітації подавалися: в одному випадку – пуасонівський потік, в іншому - самоподібний (з тими самими середніми значеннями). Для різних значень навантаження вхідного потоку $\rho \in [0,1]$ та параметра H обчислювалося відношення η_1 середніх довжин черг (рис. 4а) для самоподібного потоку до пуасонівського та аналогічне відношення η_2 середніх затримок пакетів (середня тривалість перебування пакета в системі) (рис.4б) та η_3 імовірності відмов системи (втрат пакетів)(рис. 4в).

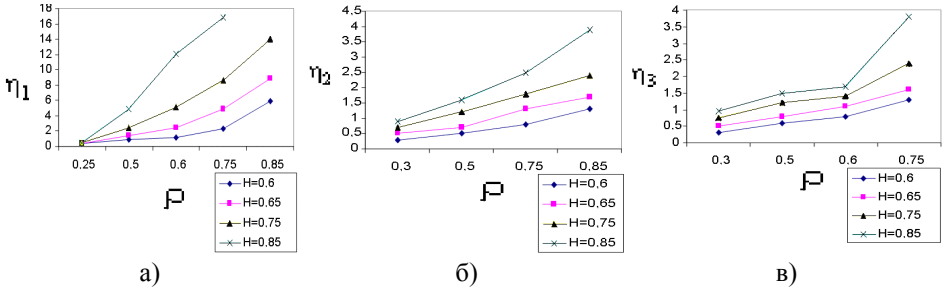


Рис. 4. Графіки порівняння навантаження на вузол мережі для різних видів потоків

Аналіз наведених на рис.4 залежностей демонструє негативний вплив самоподібного трафіка на функціонування вузла мережі, який викликає навантаження у рази більше, ніж пуасонівський.

У **третьому розділі** розроблено методи, які дозволяють для реального трафіка телекомунікаційної мережі, що не володіє марківськими властивостями, виконати марківську апроксимацію. Вона дозволить використовувати стандартні методи теорії масового обслуговування для розв'язання задач управління ресурсами вузлів маршрутизації.

На рис.2 та рис.3 показано гістограми довжин пакетів трафіка, який надходить до входу вузла мережі. Він є суперпозицією декількох потоків, які відрізняються один від одного законами розподілів та чисельними значеннями їх параметрів.

Для опису суперпозиції двох потоків пропонується модель, до складу якої входить два ерлангівських розподіли, які описують довжини пакетів. Параметри моделі λ_1 , λ_2 , m_1 , m_2 та p , імовірність того, що отриманий пакет належить першому потоку, відшуковуються по МНК та методом максимуму правдоподібності.

$$f_3(x) = p \frac{x^{m_1-1} \lambda_1^{m_1}}{(m_1-1)!} e^{-\lambda_1 x} + (1-p) \frac{x^{m_2-1} \lambda_2^{m_2}}{(m_2-1)!} e^{-\lambda_2 x} \quad (6)$$

Для перевірки справедливості прийнятої гіпотези про щільності розподілів довжин пакетів складових результуючого потоку використовується критерій χ^2 .

Дослідження моделі (6), до складу якої входять два ерлангівські розподіли другого порядку, показало, що вона досить добре описує двомодальні гістограми, а розподіли ерлангу вищих порядків не мають значної переваги.

У роботі запропоновано метод, який дозволяє віднести кожний пакет до одного з потоків, які складають результуючий потік, по параметру - довжина пакета. Введено гіпотези: H_0 - пакет належить першому потоку, H_1 - пакет належить другому потоку. Введено рандомізоване вирішуюче правило $A(x)$, яке полягає в тому, що якщо спостережуваний параметр має значення x , то рішення про справедливість гіпотези H_0 відкидається з імовірністю $A(x)$. Це правило обрано таким чином, щоб максимізувати потужність критерію при заданому рівні значимості.

Розв'язання задачі дозволило сформулювати співвідношення для граничного значення довжини пакета, при перевірці якого пакет повинен бути віднесений до другого потоку, а якщо ні, то - до першого, при заданій імовірності помилки першого роду α . Для окремого випадку, коли $m_1 = m_2$, граничне значення x^* відшукується зі співвідношення

$$\int_{x^*}^{\infty} \frac{x^{m_1-1} \lambda_1^{m_1}}{(m_1-1)!} e^{-\lambda_1 x} dx = \alpha \quad (7)$$

Гістограми випадкової тривалості інтервалів між пакетами для першого і другого потоків після розщеплення наведено на рис. 5. Отримані гістограми довжин пакетів для кожного потоку, апроксимовані щільністю розподілу Ерланга 2-го порядку, наведені на рис. 6.

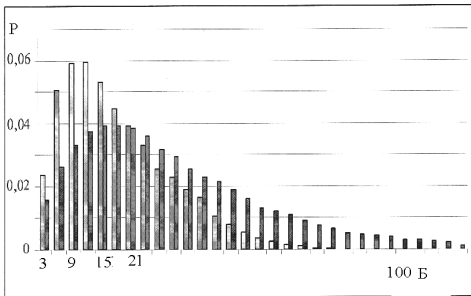


Рис. 5. Гістограми інтервалів між пакетами для першого і другого потоків

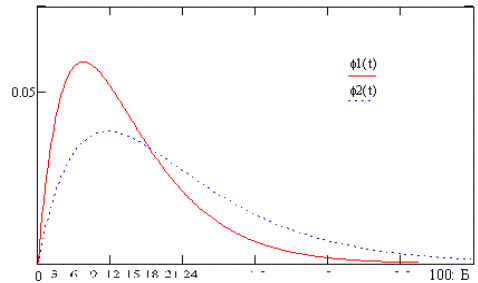


Рис. 6. Щільності розподілів інтервалів між пакетами для першого і другого потоків

Доцільність виконання розщеплення суперпозиції потоків на складові при моделюванні вузла мережі проілюстрована графіком на рис. 7. Помилка в розрахунку довжини черги η_p розраховується як відношення середніх довжин черг у системі, коли розщеплення потоку не виконують - $\hat{\eta}$ та виконують - $\tilde{\eta}$, формула (8). Графіки залежності η_p від навантаження сумарного потоку ρ_Σ наведено на

рис. 7. Розрахунок зроблено для варіантів, коли кількість потоків $n = 2$ (крива η_1) та $n = 3$ (крива η_2).

$$\eta_p = \frac{\tilde{\ell}}{\ell} = \left(n \left(\sum_{j=1}^n \frac{\lambda_j}{\mu_j} \right)^2 \sum_{j=1}^n \lambda_j \mu_j \left[\sum_{j=1}^n \lambda_j \mu_j - \hat{\lambda}_{\Sigma}^2 \right] \right) / \left(\left(1 - \sum_{j=1}^n \frac{\lambda_j}{\mu_j} \right) \hat{\lambda}_{\Sigma}^4 \right). \quad (8)$$

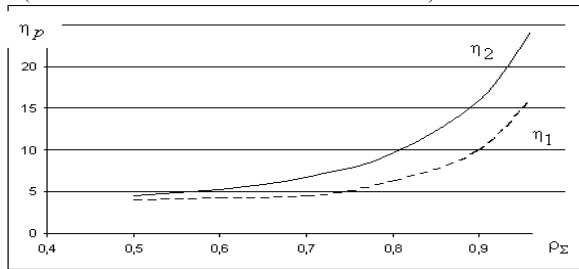


Рис. 7. Залежність похибки в оцінюванні довжини черги від навантаження

У реальному трафіку телекомунікаційної мережі часто виникають ситуації, коли у його структурі присутні потоки коротких пакетів, відповідних системним пакетам. У такому випадку на графіку розподілу довжин пакетів з'являється додатковий пік в області малої довжини пакета (рис. 8.). Адекватна цій ситуації формальна модель має вигляд:

$$\varphi(x) = p_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 x} + p_2 x \lambda_2^2 e^{-\lambda_2 x} + (1 - p_1 - p_2) x \lambda_3^2 e^{-\lambda_3 x}, \quad i = 1, 2. \quad (9)$$

Тут p_i – імовірність появи пакета, що належить i -му за довжиною потоку.

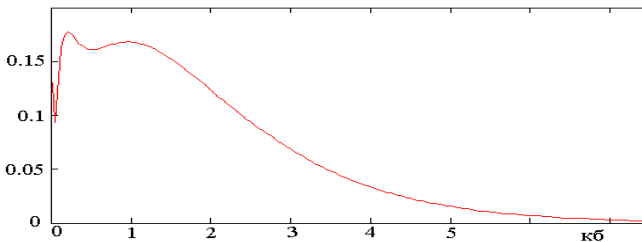


Рис. 8. Графік розподілу довжин пакетів трикомпонентного потоку

Розщеплення реального потоку на складові, кожна з яких описується розподілом Ерланга належного порядку, дозволяє здійснити марківську апроксимацію кожного компонента композиційного потоку, що у свою чергу робить можливим використання математичного апарату систем масового обслуговування для аналізу вузлів телекомунікаційних мереж. Схему цієї технології наведено на рис. 9.

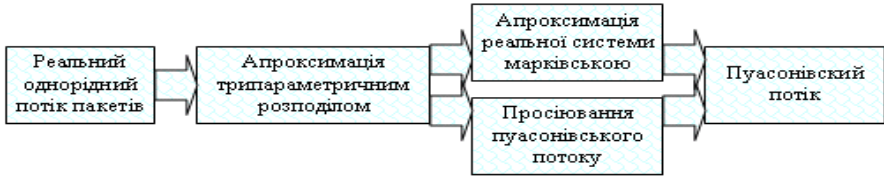


Рис. 9. Схема марківської апроксимації

У роботі запропоновано технологію марківського наближення, яка ґрунтується на тому факті, що розподіл випадкового інтервалу часу між пакетами має щільність розподілу з важким хвостом, яка може бути апроксимована трипараметричним розподілом з асиметрією, що управляється:

$$\varphi(\theta) = \begin{cases} A \times \exp\left[-\frac{(\theta - \theta_1)^2}{2\theta_2^2}(1 + \theta_3 \operatorname{sign}(\theta - \theta_1))\right], & \theta \geq 0 \\ 0, & \theta < 0 \end{cases}, \quad A = \frac{2}{\theta_2 \sqrt{2\pi} (\sqrt{1 + \theta_3} + \sqrt{1 - \theta_3})}, \quad (10)$$

де θ_1 – параметр, що задає математичне сподівання, θ_2^2 – дисперсію, θ_3 – асиметрію.

У свою чергу імітаційною моделлю вузла мережі, до входу якої подавалися потоки пакетів, які задавалися трипараметричним розподілом (10), для різних наборів значень параметрів $\theta_1^{(i)}, \theta_2^{(i)}, \theta_3^{(i)}$ були отримані характеристики системи масового обслуговування P_{ik} , тобто імовірності зайнятості рівно k каналів для i -го варіанта імітації. Тоді для заданих наборів $\theta_1^{(i)}, \theta_2^{(i)}, \theta_3^{(i)}$ відшукуються параметри λ_i, μ_i марківської системи за критерієм:

$$I_i = \sum_{k=0}^n (P_{ik} - \hat{P}_{ik})^2 \rightarrow \min, \quad \hat{P}_{ik} = \left[\frac{\lambda_i^k}{\mu_i^k k!} \right] / \left[\sum_{l=0}^n \frac{\lambda_i^l}{\mu_i^l l!} \right], \quad k = 0, 1, \dots, 5, i = 1, 2, \dots, 1296, \quad (11)$$

де \hat{P}_{ik} – оцінка імовірності зайнятості рівно k каналів для i -го варіанта імітації для апроксимуючої системи обслуговування за формулами Ерланга.

Дисперсія помилки розрахунків компонентів розподілу ймовірностей зайнятості каналів для розподілів з негативною асиметрією $\sigma \approx 0.038$.

Використовуючи отримані статистичні дані імітаційної моделі вузла мережі, будується модель регресії залежності параметрів марківської моделі вузла від параметрів вихідних щільностей немарківської системи, коефіцієнти (табл. 1) якої відшукуються використанням МНК. Тоді рівняння регресії для параметрів λ, μ мають вигляд:

$$\lambda = a_0 + a_1 \theta_1^{(1)} + a_2 \theta_2^{(1)} + a_3 \theta_3^{(1)} + a_4 (\theta_1^{(1)})^2 + a_5 (\theta_2^{(1)})^2 + a_6 (\theta_3^{(1)})^2, \quad (12)$$

$$\mu = b_0 + b_1 \theta_1^{(2)} + b_2 \theta_2^{(2)} + b_3 \theta_3^{(2)} + b_4 (\theta_1^{(2)})^2 + b_5 (\theta_2^{(2)})^2 + b_6 (\theta_3^{(2)})^2. \quad (13)$$

Значення коефіцієнтів регресії

a_0	11,051	b_0	8,549	a_4	5,939	b_4	7,599
a_1	-7,918	b_1	-11,824	a_5	-0,819	b_5	-2,101
a_2	-1,127	b_2	1,418	a_6	-0,378	b_6	0,237
a_3	0,613	b_3	0,421				

Аналіз відносних помилок апроксимації показав, що відносна похибка моделей регресії не перевершує 10-12%, що для практичних цілей прийнятно.

Більш перспективний метод із погляду похибки апроксимації та наступного використання полягає у тому, що для кожного набору параметрів $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ трипараметричного розподілу $\varphi(\theta)$ відшукуються найкращі значення параметрів λ_E ерлангівського розподілу другого порядку $f_2(\theta)$, які мінімізують відповідний критерій:

$$\eta_2(\lambda_E, \theta_1, \theta_2, \theta_3) = \frac{1}{\theta_{\max}} \int_0^{\theta_{\max}} [\varphi(\theta) - f_2(\theta)]^2 d\theta, \quad f_2(\theta) = \lambda(\lambda\theta)e^{-\lambda\theta}, \quad (14)$$

де θ_{\max} – значення вхідного параметру функцій $\varphi(\theta)$ та $f_2(\theta)$, при якому вони отримують дуже маленькі значення на виході.

Показано, що якість наближення розподілу $\varphi(\theta)$ ерлангівським розподілом $f_2(\theta)$ є досить високою, а ерлангівський розподіл третього порядку не має переваги в якості наближення у порівнянні з розподілом другого порядку. Таким чином, використовуємо отримані набори $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ трипараметричного розподілу $\varphi(\theta)$ і відповідні їм значення параметра λ_E розподілу Ерланга другого порядку $f_2(\theta)$, отримані за критерієм (14), для побудови функціональної залежності $\lambda_E(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$:

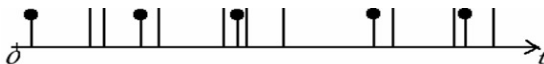
$$\lambda_E = a_0 + a_1\theta_1 + a_2\theta_2 + a_3\theta_3 + a_{12}\theta_1\theta_2 + a_{13}\theta_1\theta_3 + a_{23}\theta_2\theta_3 + a_{123}\theta_1\theta_2\theta_3. \quad (15)$$

Параметри $\hat{A} = (a_0, a_1, a_2, \dots, a_{123})$ знаходяться по МНК.

Тепер процедура одержання аналітичного опису вхідного потоку у вузлі маршрутизації така: будуються гістограми випадкового інтервалу між пакетами; гістограми апроксимуються трипараметричним розподілом $\varphi(\theta)$; розраховується параметр λ_E для потоку Ерланга другого порядку $f_2(\theta)$, який щонайкраще наближає до отриманого розподілу $\varphi(\theta)$ з урахуванням знайденого \hat{A} .

Використання методу марківського наближення полягає у тому, що ерлангівський потік являє собою просіяний пуасонівський (рис. 10). Якщо, наприклад, складова потоку має розподіл Ерланга другого порядку, то такий потік формується, якщо простіший пуасонівський потік (це потік Ерланга першого порядку) просіяти, виділивши кожну групу подію.

Потік Пуасона



Потік Ерланга 3-го порядку



Рис. 10. Пуасонівський потік та Ерлангівський потік 3-го порядку

У такій марківській системі масового обслуговування перехід з поточного стану системи в чергове здійснюється за два кроки. При цьому на першому кроці система переходить із поточного стану в деякий фіктивний, проміжний стан, а на другому кроці – у черговий дійсний стан (рис. 11).

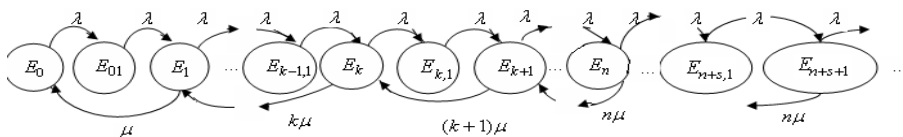


Рис. 11. Граф станів і переходів системи без втрат з ерлангівським вхідним потоком і експонентним обслуговуванням

Тут E_k – стан, коли в системі зайнято рівно k каналів, $k = 0, 1, 2, \dots, n$; $E_{k,1}$ – буферний стан, що відповідає ситуації, коли в системі зайнято рівно k каналів і надійшов фіктивний пакет, який буде відсіяний і тому не впливає на зміну кількості зайнятих каналів, $k = 0, 1, 2, \dots, n - 1$; λ – інтенсивність вхідного, що просівається, пуасонівського потоку; μ – інтенсивність обслуговування.

Якщо тепер у цій отриманій системі виділяти та аналізувати тільки переходи в парні її стани, то поведінка системи буде відповідати поведінці вихідної системи, до входу якої надходить потік Ерланга другого порядку.

Для описаної системи отримано співвідношення для ймовірностей станів:

$$P_0 = \frac{1}{2 \left[\sum_{k=0}^n \frac{\lambda^k}{k! \mu^k} + \frac{\lambda^{n+1}}{n! \mu^n (n\mu - \lambda)} \right]}, P_k = \frac{\frac{\lambda^k}{k! \mu^k}}{2 \left[\sum_{\ell=0}^n \frac{\lambda^\ell}{\ell! \mu^\ell} + \frac{\lambda^{n+1}}{n! \mu^n (n\mu - \lambda)} \right]}, P_{n+s} = \frac{\frac{\lambda^{n+s}}{n! \mu^{n+s}}}{2 \left[\sum_{\ell=0}^n \frac{\lambda^\ell}{\ell! \mu^\ell} + \frac{\lambda^{n+1}}{n! \mu^n (n\mu - \lambda)} \right]}, \quad (16)$$

$s = 1, 2, \dots, k = 0, 1, 2, \dots, n$

Отримані формули марківської системи дозволяють відшукати ймовірності станів для Ерлангівської системи, складаючи ймовірності реального та відповідного йому фіктивного станів

$$P_{k,\varnothing} = P_k + P_{k,1} = 2P_k, P_{n+s,\varnothing} = 2P_{n+s}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, n$$

Аналогічно може бути проведено аналіз системи, до входу якої надходить потік Ерланга l -го порядку. Отримано відповідні співвідношення.

Доцільність виконання марківського наближення проілюстровано графіком на рис. 12, на якому показана залежність похибки η_{II} безпосередньої пуассонівської апроксимації реального потоку від навантаження вхідного потоку ρ . Тут η_{II} розраховується як відношення ймовірностей відмови системи із пуассонівським потоком $P_{отк}^{(II)}$ до аналогічної із ерлангівським $P_{отк}^{(Э)}$, формула (17).

$$\eta_{II} = \frac{P_{отк}^{(II)}}{P_{отк}^{(Э)}} = \frac{\left[\left(\ell \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\rho^k}{k!} + \frac{\rho^n}{n!} \right) \left(\rho / \ell \right)^n \right]}{\left[\sum_{k=0}^n \frac{\left(\rho / \ell \right)^k}{k!} \right] \rho^n}. \quad (17)$$

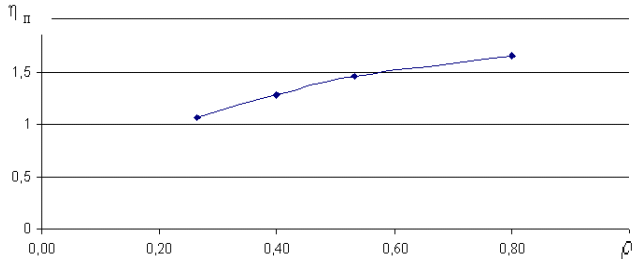


Рис. 12. Залежність похибки безпосередньої пуассонівської апроксимації потоку від вхідного навантаження на вузол мережі

Виконана апроксимація описів складових реального неоднорідного потоку розподілами Ерланга необхідних порядків дозволяє використовувати стандартні методи марківських процесів для дослідження реальних систем. Труднощі, які тут виникають, пов'язані з необхідністю розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь, розмірність якої дуже висока, наприклад, якщо кількість потоків дорівнює двом, то граф станів та переходів цієї задачі буде двовимірним, а якщо трьом, тоді тривимірним.

Для подолання проблеми розмірності використовується евристичний метод, що реалізує декомпозиційний підхід. Суть методу полягає у тому, що вся множина станів системи розбивається певним чином на підмножини, які називають груповими станами системи. Імовірність перебування в групі обчислюється складанням імовірностей станів, які входять до групи. Імовірності переходів між різними видами станів обчислюються за відповідними співвідношеннями.

$$\tilde{P}_{ls,lv}^{(k)} = \sum_{q=1}^{n_v} P_{ls,lv}, \quad v = 1, 2, \dots, l-1, l+1, \dots, m. \quad (18)$$

$$\tilde{P}_{lv,ls}^{(k)} = \sum_{q=1}^{n_v} P_{vq,ls} \cdot W_{vq}^{(k)} = \sum_{q=1}^{n_v} P_{vq,ls} \cdot \frac{\pi_{vq}^{(k)}}{\sum_{q=1}^{n_v} \pi_{vq}^{(k)}}. \quad \tilde{P}_{l_{v_1} l_{v_2}}^{(k)} = \sum_{q_2=1}^{n_{v_2}} \sum_{q_1=1}^{n_{v_1}} P_{v_1 q_1, v_2 q_2} \cdot \frac{\pi_{v_1 q_1}^{(k)}}{\sum_{q_1=1}^{n_{v_1}} \pi_{v_1 q_1}^{(k)}}. \quad (19)$$

Тут i_{ls} - неукрупнений стан; I_V - групований стан; I_{v_1} - стан групованої підмножини станів; $\pi_{v_1 q_1}^{(k)}$ - імовірність перебування у стані $v_1 q_1$ на k ітерації; p_{ij} - елемент матриці переходів W .

На кожній ітерації методу із сукупності укрупнених підмножин станів розукрупнення зазнає кожна наступна підмножина та для отриманої системи вирішується система лінійних алгебраїчних рівнянь, розмірність якої менша. Обчислення тривають доти, поки на черговій $(N+1)$ -й ітерації для деякого досить малого ε не буде виконана нерівність для вектора ймовірностей станів $|\pi^{(N+1)} - \pi^{(N)}| < \varepsilon$.

Істотне прискорення описаної процедури досягається за рахунок її модернізації за двома напрямками. По-перше, для кожної групованої підмножини станів $E_\ell = \{i_1, i_2, \dots, i_{\ell n}\}$ виділяється відповідна підматриця W_ℓ з матриці переходів системи $W = (p_{ij})$ і нормується по формулі $\hat{p}_{s_1, s_2} = p_{s_1, s_2} / \sum_{s_2 \in E_\ell} p_{s_1, s_2}$, $s_1 \in E_\ell$. Початковий розподіл імовірностей для станів ℓ -ї підмножини обчислюється зі співвідношення $(\pi_{\ell 1}^{(0)}, \pi_{\ell 2}^{(0)}, \dots, \pi_{\ell n_\ell}^{(0)}) = (\pi_{\ell 1}^{(0)}, \pi_{\ell 2}^{(0)}, \dots, \pi_{\ell n_\ell}^{(0)}) \cdot (\hat{p}_{s_1, s_2})$. По-друге, при розрахунках групового розподілу $\tilde{\pi}^{(k+1)}$ замість процедури покрокових розрахунків $\tilde{\pi}^{(k+1)} = \tilde{\pi}^{(k)} \cdot \tilde{W}^{(k)}$ доцільно вирішувати систему лінійних алгебраїчних рівнянь $\tilde{\pi}^{(k+1)} = \tilde{\pi}^{(k+1)} \cdot \tilde{W}^{(k)}$. Розв'язання цієї системи рівнянь не викликає труднощів, тому що її розмірність у результаті укрупнення незначна.

Проведено експериментальну оцінку ефективності описаної модернізації базової технології укрупнення станів, результати якої відображені на рис. 13. По осі абсцис відкладено показник степеня m кількості 10^m станів системи, що укрупнюється, а по осі ординат – відношення V кількості ітерацій у базовій процедурі до відповідної кількості ітерацій для модернізованої процедури.

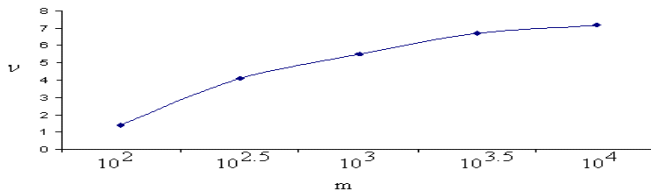


Рис. 13. Оцінка ефективності удосконалення процедури укрупнення станів

Істотним підвищенням ефективності методу укрупнення станів є використання багатоетапних, ієрархічних процедур.

Результати практичного застосування створеної технології фазового укрупнення станів показують, що ефективність цієї процедури суттєво залежить від того, яким саме чином виконано укрупнення. Керованими параметрами процедури

укрупнення є: кількість груп, на які розбивається вся множина станів, і якісний склад цих груп (див. табл. 2):

Таблиця 2

Порівняння ефективності стратегій укрупнення

Розмірність задачі	Значення інтенсивностей переходів	Ефективність укрупнення (тривалість розв'язання задачі в сек.)	
		по «горизонталі»	по «вертикалі»
$n_1 = 50$	$\lambda_1 = \mu_1 = 1; \lambda_2 = \mu_2 = 1$	<i>Тривалість розв'язання однакова</i>	
$n_2 = 50$	$\lambda_1 = \mu_1 = 1; \lambda_2 = \mu_2 = 10^{-3}$	12,4	286,6
$n_1 = 2$ $n_2 = 1000$	$\lambda_1 = \mu_1 = 1; \lambda_2 = \mu_2 = 1$	16,1	320,4
	$\lambda_1 = \mu_1 = 1; \lambda_2 = \mu_2 = 10^{-3}$	9,7	638,3
	$\lambda_1 = \mu_1 = 10^{-3}; \lambda_2 = \mu_2 = 1$	51,3	39,6
$n_1 = 4000$ $n_2 = 2$	$\lambda_1 = \mu_1 = 1; \lambda_2 = \mu_2 = 10^{-4}$	90,1	113,8
	$\lambda_1 = \mu_1 = 10^{-4}; \lambda_2 = \mu_2 = 1$	>1200	60,7

На ґрунті розроблених методів запропоновано рекомендації. Укрупнення тим більш корисне, чим більше станів у підмножині, що укрупнюється. Укрупнення тим більш корисне, чим вище інтенсивність переходів між станами підмножини, що укрупнюється.

З використанням цих рекомендацій запропоновано простий евристичний критерій для вибору стратегії укрупнення – середня тривалість досягнення одного крайнього стану підмножини, що укрупнюється, з іншого.

При цьому, коли процес функціонування системи є напівмарківським, який задано множиною можливих станів, початковим станом і матрицею незалежних функцій розподілу $Q_{ij}(t)$, $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2, \dots, n$ тривалостей перебування процесу в стані i до переходу в стан j , шуканий набір фінальних імовірностей P_i , $i = 1, 2, \dots, n$ розраховується за формулами:

$$P_i = \frac{\pi_i T_i}{\sum_{i=1}^n \pi_i T_i}, \quad T_i = \int_0^{\infty} (1 - F_i(t)) dt, \quad F_i(t) = \sum_{j \neq i} P_{ij}(t), \quad P_{ij}(t) = \int_0^t \prod_{0 \neq k \neq j} (1 - Q_{ik}(\tau)) dQ_{ij}(\tau), \quad (20)$$

$$i = 1, 2, \dots, n \quad i \neq j,$$

тут $P_{ij}(t)$ – імовірність переходу системи зі стану i в стан j за час t , $F_i(t)$ – безумовна функція розподілу тривалостей перебування в i до виходу в будь-який інший стан, T_i – середня тривалість перебування в кожному зі станів системи до виходу, π_i – імовірність перебування вкладеного марківського ланцюга в стані i .

Таким чином, вихідну задачу аналізу асимптотичної поведінки напівмарківського процесу скорочено до суттєво більш простої задачі того ж типу, але для марківської системи. При цьому можливість практичної реалізації

викладеної технології цілком залежить від можливості розрахунків граничного вектора $\pi = (\pi_1 \pi_2 \dots \pi_n)$, який у свою чергу визначається розмірністю задачі.

У **четвертому розділі** розроблено марківські моделі вузлів маршрутизації ТКС з неординарним та неоднорідним вхідним потоком із пріоритетами.

У роботі запропонована модель одноканального вузла ТКС із неординарним трафіком, до входу якого надходить пуасонівський потік групових пакетів з інтенсивністю λ і відомим розподілом кількості пакетів у групі $\{P_k\} = (p_1, p_2, \dots, p_k, \dots)$, та інтенсивністю обслуговування – μ . Тоді безумовна інтенсивність переходу у такій системі дорівнює

$$\lambda_{ij} = \begin{cases} \lambda P_{j-i}, & j > i, \\ \mu, & j = i - 1. \end{cases} \quad (21)$$

Граф станів і переходів отриманої моделі представлено на рис. 14.

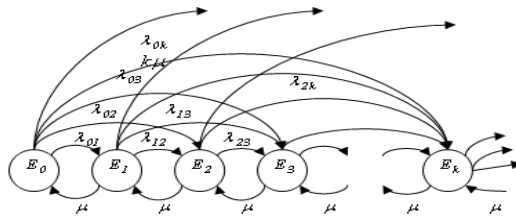


Рис.14. Граф станів і переходів системи із груповими пакетами

Для вирішення задачі необхідно відшукати вектор $\pi = (\pi_0, \pi_1, \pi_2, \dots)$, де π_k - стаціонарна ймовірність перебування у системі рівно k пакетів, із системи лінійних алгебраїчних рівнянь Колмогорова:

$$\begin{cases} \lambda \pi_0 = \mu \pi_1, \\ (\lambda + \mu) \pi_1 = \mu \pi_2 + \lambda \sum_{i=0}^0 \pi_i P_{1-i}, \\ \dots \\ (\lambda + \mu) \pi_k = \mu \pi_{k+1} + \lambda \sum_{i=0}^{k-1} \pi_i P_{k-i}, \\ \dots \\ \sum_{k=0}^{\infty} \pi_k = 1. \end{cases} \quad (22)$$

Отримана система розв'язується шляхом отримання співвідношення для виробляючої функції

$$P(z) = \frac{\mu(z-1)(1-\alpha\bar{k})}{z(\lambda+\mu)-\mu-\lambda zR(z)}, \quad R(z) = \sum_{s=1}^{\infty} z^s p_s, \quad \alpha = \frac{\lambda}{\mu}, \quad \bar{k} = R'(1) = \sum_{k=1}^{\infty} k P_k, \quad (23)$$

при розкладанні якої в ряд Тейлора по ступенях z одержується шуканий набір $\{\pi_k\}$, $k = 0, 1, 2, \dots$. Показано, що ймовірність того, що система в довільний момент часу

вільна, не залежить від розподілу $\{p_k\}$, а визначається тільки середньою кількістю вимог у групі.

Доцільність запропонованого методу проілюстровано графіком на рис. 15, де показано залежність η_{Γ} від навантаження вхідного потоку ρ_{Σ} , де η_{Γ} – відношення ймовірності вільного каналу у системі із пуасонівським вхідним потоком – π_0 до системи із вхідним груповим потоком – $\hat{\pi}_0$, формула (24).

$$\eta_{\Gamma} = \frac{\hat{\pi}_0}{\pi_0} \cong \frac{1}{(1 + \rho_{\Sigma})(1 - \rho_{\Sigma})} = \frac{1}{1 - \rho_{\Sigma}^2}. \quad (24)$$

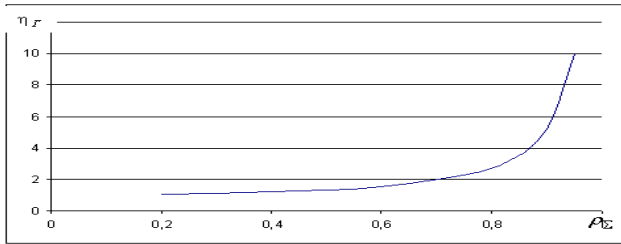


Рис. 15. Графік помилки у розрахунку ймовірності того, що канал вільний

У роботі запропоновано модель одноканального вузла маршрутизації ТКС з неоднорідним вхідним потоком пакетів без пріоритетів. Тут λ_1 і λ_2 – інтенсивності вхідних потоків, μ_1 і μ_2 – відповідно інтенсивності обслуговування, n_1 і n_2 – довжини черг для пакетів першого та другого типу. Для даної моделі розраховано безумовні ймовірності перебування системи на множині станів:

$$P_{i,k} = \frac{\rho_1^i \cdot \rho_2^k (1 - \rho_1)(1 - \rho_2)}{(1 - \rho_1^{n_1+1})(1 - \rho_2^{n_2+1})}, \quad i = 0, 1, \dots, n_1, \quad k = 0, 1, \dots, n_2, \quad \rho_1 = \frac{\lambda_1}{\mu_1}, \quad \rho_2 = \frac{\lambda_2}{\mu_2}. \quad (25)$$

За умови, що довжина черг не обмежена, середня кількість пакетів першого та другого потоків, які очікують обслуговування, і тривалість очікування визначаються відповідними співвідношеннями:

$$\bar{n}_1 = \frac{\rho_1}{1 - \rho_1}, \quad \bar{n}_2 = \frac{\rho_2}{1 - \rho_2}, \quad \bar{\tau} = \bar{n}_1 / \mu_1 + \bar{n}_2 / \mu_2. \quad (26)$$

У моделі вузла ТКС із вхідним потоком пакетів з абсолютним пріоритетом пакети можуть переривати обслуговування, поступившись цим правом пакету з більш високим пріоритетом, що прибув. Співвідношення, що дозволяє обчислити безумовні ймовірності станів такої системи, має вигляд:

$$P_{ik} = \frac{\rho_1^i (1 - \rho_1) \cdot \left[\frac{\rho_2 (1 - \rho_1^{n_1+1})}{1 - \rho_1} \right]^k}{(1 - \rho_1^{n_1+1})} = \frac{\rho_1^i \rho_2^k (1 - \rho_1^{n_1+1})^{k-1}}{(1 - \rho_1)^{k-1}}, \quad i = 0, 1, \dots, n_1, \quad k = 0, 1, \dots, n_2. \quad (27)$$

Якщо вважати, що довжину черг у цій системі не обмежено, то таке співвідношення спрощується до вигляду:

$$P_{ik} = \rho_1^i \left(\frac{\rho_2}{1 - \rho_1} \right)^k (1 - \rho_1 - \rho_2), i = 0, 1, 2, \dots, k = 0, 1, 2, \dots, \quad (28)$$

а середня довжина черг і середній час обслуговування для пакетів кожного типу дорівнюють відповідно:

$$\bar{n}_1 = \frac{\rho_1}{1 - \rho_1}, \bar{n}_2 = \frac{\rho_2}{1 - \rho_1 - \rho_2}, \bar{\tau}_1 = \frac{\bar{n}_1}{\mu_1}, \bar{\tau}_2 = \frac{\bar{n}_1}{\mu_1} + \frac{\bar{n}_2}{\mu_2}. \quad (29)$$

У роботі запропонована модель багатоканального вузла маршрутизації ТКС з неоднорідним вхідним потоком. Для системи з абсолютним пріоритетом першого потоку пакетів перед другим імовірність перебування системи на множині станів обчислюється за формулою:

$$P_{ik} = \frac{\alpha_1^i \alpha_2^k \left(1 + \sum_{i=1}^{n_1} \frac{\alpha_1^i}{2^{i-1}} \right)^k}{2^{i-1} (1 + \alpha_1)(2 + \alpha_1)^{k-1}} \left/ \left(\left(1 + \sum_{i=1}^{n_1} \frac{\alpha_1^i}{2^{i-1}} \right) \left(1 + \sum_{k=1}^{n_2} \frac{\alpha_2^k \left(1 + \sum_{i=1}^{n_1} \frac{\alpha_1^i}{2^{i-1}} \right)^k}{(1 + \alpha_1)(2 + \alpha_1)^{k-1}} \right) \right), i = 1, 2, \dots, n_1, k = 1, 2, \dots, n_2. \quad (30)$$

У моделі, яку ускладнено наявністю відносного пріоритету одних пакетів перед іншими, пакет, що надходить у момент, коли система обслуговує інший, з меншим пріоритетом, не перериває обслуговування, а ставить прибулий пакет у чергу.

При цьому проведено дослідження впливу пріоритету на середню довжину черги для кожного з потоків у системі з абсолютним пріоритетом одних пакетів перед іншими. Введено критерії $\eta_0 = \bar{n}_{20}/\bar{n}_{10}$, $\eta_1 = \bar{n}_2/\bar{n}_1$, де \bar{n}_{10} – середня довжина черги для першого потоку в системі без пріоритету; \bar{n}_{20} – середня довжина черги для другого потоку в системі без пріоритету; \bar{n}_1 – середня довжина черги для першого потоку в системі з абсолютним пріоритетом; \bar{n}_2 – середня довжина черги для другого потоку в системі з абсолютним пріоритетом. Для фіксованого значення приведеної інтенсивності другого потоку $\rho_2 = 0.3n$ отримано залежність η_0 і η_1 від приведеної інтенсивності ρ_1 першого, більш пріоритетного потоку. Відповідні графіки наведено на рис. 16.

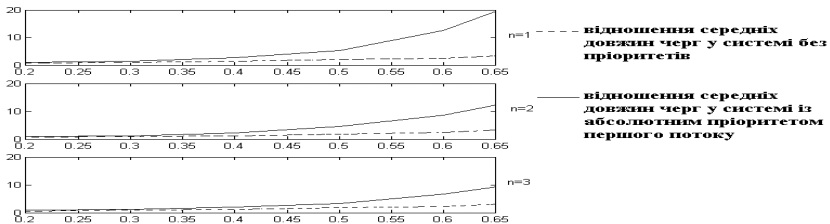


Рис. 16. Відношення середніх довжин черг для потоків із різними пріоритетами

Для моделі n каналного вузла мережі з відмовами, до входу якого надходить ℓ потоків із пріоритетами, запропоновано наближений метод поетапного одержання розв'язку по кожному потоку, множину яких заздалегідь ранжирувано по убуванню пріоритету.

Імовірність того, що k потік займає S_k каналів обслуговування описується наступним співвідношенням:

$$P_{s_k} = \frac{\left[\left(\frac{\lambda_k}{\mu_k} \right)^{s_k} \right]}{s_k!} / \left[\left[\sum_{r=1}^{k-1} \bar{S}_r \right] \left(\frac{\lambda_k}{\mu_k} \right)^q \right]_{q=0}^{n - \sum_{r=1}^{k-1} \bar{S}_r}, \quad s_k = 0, 1, 2, \dots, n - \sum_{r=1}^{k-1} \bar{S}_r. \quad (31)$$

Імовірність відмови та середня кількість зайнятих каналів для k потоку описуються відповідними співвідношеннями:

$$P_{omk_k} = \frac{\left(\frac{\lambda_k}{\mu_k} \right)^{n - \sum_{r=1}^{k-1} \bar{S}_r}}{\left(n - \sum_{r=1}^{k-1} \bar{S}_r \right)!} / \left[\sum_{q=0}^{n - \sum_{r=1}^{k-1} \bar{S}_r} \left(\frac{\lambda_k}{\mu_k} \right)^q \right] q!}, \quad \bar{S}_k = \frac{\lambda_k}{\mu_k} (1 - P_{omk_k}) = \frac{\lambda_k}{\mu_k} \left(1 - \frac{\left(\frac{\lambda_k}{\mu_k} \right)^{n - \sum_{r=1}^{k-1} \bar{S}_r}}{\left(n - \sum_{r=1}^{k-1} \bar{S}_r \right)!} / \left[\sum_{q=0}^{n - \sum_{r=1}^{k-1} \bar{S}_r} \left(\frac{\lambda_k}{\mu_k} \right)^q \right] q!} \right). \quad (32)$$

Похибка отриманої технології визначається округленням залишкової кількості каналів до цілого значення, не перевищує 9% і падає з ростом приведених інтенсивностей потоків ρ і кількості каналів n . На рис. 17 наведено графіки залежності ймовірностей відмови P_{omk_2} , обчисленої по описаному методу, та $P_{omk_2}^o$, обчисленої аналітично, від ρ для різних значень n .

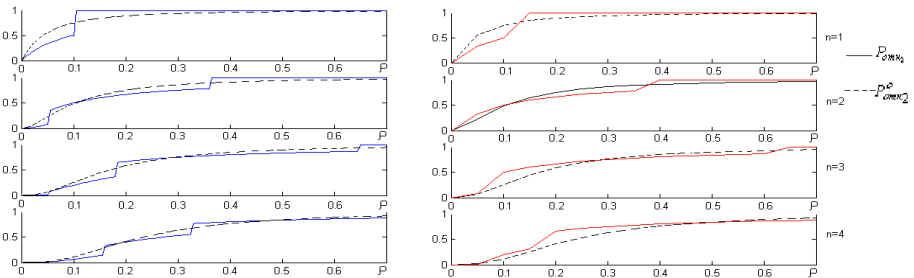


Рис. 17. Залежності ймовірностей P_{omk_2} , $P_{omk_2}^o$ від щільності потоків пакетів, розрахованих для різної кількості каналів

У п'ятому розділі розроблено методи управління дисципліною обслуговування потоків пакетів у вузлах маршрутизації ТКС. При цьому враховано, що потік пакетів для кожного вузла мережі являє собою суперпозицію деякої кількості неоднорідних потоків різної інтенсивності, які містять пакети різної (у середньому) довжини. Управління дисципліною обслуговування пакетів являє собою оптимальне використання долі часу процесора вузла ТКС у циклі обслуговування потоків.

Метод управління дисципліною обслуговування, запропонований у роботі, забезпечує мінімізацію максимальної імовірності того, що довжина черги з урахуванням ваги відповідного потоку буде не нижче критичної:

$$F_1(x) = \max_j P(L_j \geq L_{кр}) = \max_j \left(\frac{\lambda_j}{\mu_j x_j} \right)^{L_{кр}+1} \Rightarrow \min, \sum x_j = 1, x_j > 0, \quad (33)$$

де λ – інтенсивність вхідного потоку, μ – інтенсивність обробки пакетів, $L_{кр}$ – критична довжина черги, L_j – довжина j черги.

За цим критерієм розподіл ресурсу процесора обчислюється за формулою:

$$x_j^* = \rho_j / \sum_{j=1}^n \rho_j, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad \rho = \lambda / \mu^0. \quad (34)$$

На рис. 18 наведено оцінку η_1 ефективності запропонованого управління, яка для різних значень γ , ν має вигляд:

$$\eta_1 = \frac{P_{\max}^{(0)}}{P_{\max}^{(*)}}, \quad P_{\max} = \max \{P(L_j \geq L_{кр})\}, \quad (35)$$

$$\gamma = \frac{\max\{\rho_j\}}{\min\{\rho_j\}}, \quad \nu = \frac{\max\{\beta_j\}}{\min\{\beta_j\}}, \quad (36)$$

де $P_{\max}^{(0)}$ – значення P_{\max} у режимі без управління, $P_{\max}^{(*)}$ – значення P_{\max} у режимі з оптимальним управлінням, β_j – важливість пакетів j черги, ρ_j – приведена інтенсивність вхідного потоку j черги, n – кількість черг.

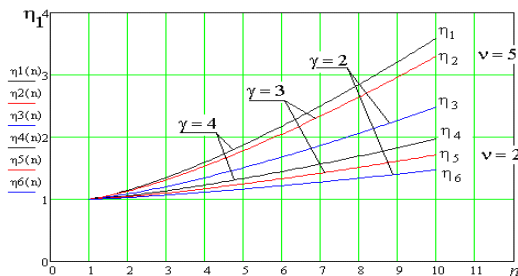


Рис. 18. Оцінка ефективності управління за критерієм – максимальна імовірність того, що довжина черги буде не нижче критичної

Наближений результат отримано у випадку, якщо раціональний розподіл ресурсу шукати з використанням адитивного критерію – середня кількість черг, довжина яких не нижче критичної:

$$F_2(x) = \sum_{j=1}^n P(L_j \geq L_{kp}) \Rightarrow \min, \sum x_j = 1, j = 1, 2, \dots, n. \quad (37)$$

Тут розподіл ресурсу процесора має вигляд:

$$x_j^* = \rho \frac{L_{kp}^{j+1}}{j^{L_{kp}^{j+2}}} / \sum_{j=1}^n \rho \frac{L_{kp}^{j+1}}{j^{L_{kp}^{j+2}}} \cong \rho j / \sum_{j=1}^n \rho j, j = 1, 2, \dots, n. \quad (38)$$

Оцінка ефективності η_2 запропонованого критерію управління наведена на рис. 19 та представлена співвідношенням:

$$\eta_2 = \frac{K^{(0)}}{K^{(*)}}, \quad (39)$$

де $K^{(0)}$ – кількість черг, для яких $L > L_{kp}$ у режимі без управління; $K^{(*)}$ – кількість черг, для яких $L > L_{kp}$ у режимі з оптимальним управлінням, використовуючи (38).

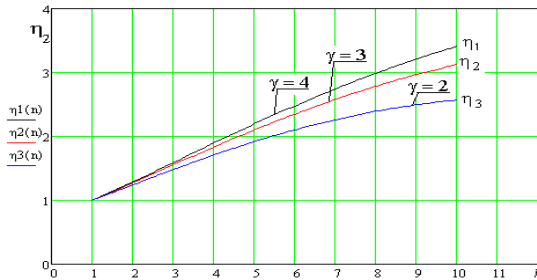


Рис. 19. Оцінка ефективності управління за критерієм – середня кількість черг, довжина яких не нижче критичної

Розроблено метод управління ресурсом із урахуванням рівності середніх довжин черг. Критерій наведено співвідношенням:

$$F_3(x) = \max_j \frac{\lambda_j^2 \beta_j}{(x_j \mu_j)^2 - \lambda_j \mu_j x_j} \Rightarrow \min, j = 1, 2, \dots, n. \quad (40)$$

Тут розподіл ресурсу процесора обчислюється за формулами:

$$x_j^* = \rho_j^{(0)} / \sum_{j=1}^n \rho_j^{(0)}, j = 1, 2, \dots, n, \rho_j^{(0)} = \lambda_j / \mu_j, \ell = \left(\sum_{j=1}^n \rho_j^{(0)} \right)^2 / \left(1 - \sum_{j=1}^n \rho_j^{(0)} \right), \quad (41)$$

де ℓ – середня довжина черг (однакова для всіх потоків).

Оцінка ефективності управління η_3 представлена на рис. 20, а співвідношення для її розрахунку має вигляд:

$$\eta_3 = \frac{L_{\max}^{(0)}}{L_{\min}^{(0)}} \bigg/ \frac{L_{\max}^{(*)}}{L_{\min}^{(*)}}, \quad (42)$$

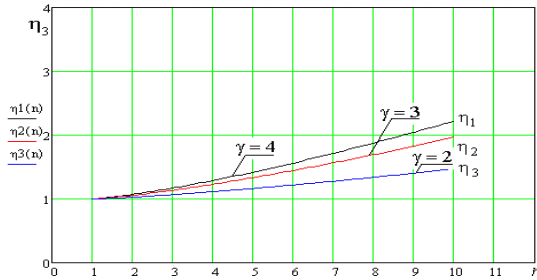


Рис. 20. Оцінка ефективності управління із урахуванням середньої довжини черг

де $L_{\max}^{(0)}$ та $L_{\min}^{(0)}$ – відповідно максимальна та мінімальна довжини черг у режимі без управління, $L_{\max}^{(*)}$ та $L_{\min}^{(*)}$ – відповідно максимальна та мінімальна довжини черг у режимі з оптимальним управлінням, використовуючи співвідношення (41).

Запропоновано технологію визначення розподілу ресурсу процесора, оптимального, у розумінні рівності середніх тривалостей очікування початку обслуговування:

$$F_4(x) = \max_j \frac{\lambda_j(T_{обс,j})}{x_j^2 - x_j \lambda_j T_{обс,j}} \Rightarrow \min, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad T_{обс,j}^{(0)} = 1/\mu_j^{(0)}. \quad (43)$$

Отримане співвідношення для розподілу ресурсу процесора має вигляд:

$$x_j^* = \rho_j^{(0)} + \left[T_{обс,j}^{(0)} \left(1 - \sum_{j=1}^n \rho_j^{(0)} \right) \right] \bigg/ \sum_{j=1}^n T_{обс,j}^{(0)}, \quad j = 1, 2, \dots, n, \quad T_{обс,j}^{(0)} = 1/\mu_j^{(0)} \quad (44)$$

і спрощується в окремому випадку, коли інтенсивності вхідних потоків пакетів, що утворюють різні за довжиною черги, рівні між собою, тобто $\lambda_j \equiv \lambda, \quad j = 1, 2, \dots, n$:

$$x_j^* = T_{обс,j}^{(0)} \bigg/ \sum_{j=1}^n T_{обс,j}^{(0)}. \quad (45)$$

Оцінка ефективності управління η_4 представлена на рис. 21, а співвідношення для цієї оцінки має вигляд:

$$\eta_4 = \frac{T_{ож}^{(0)} \max}{T_{ож}^{(0)} \min} \bigg/ \frac{T_{ож}^{(*)} \max}{T_{ож}^{(*)} \min}, \quad (46)$$

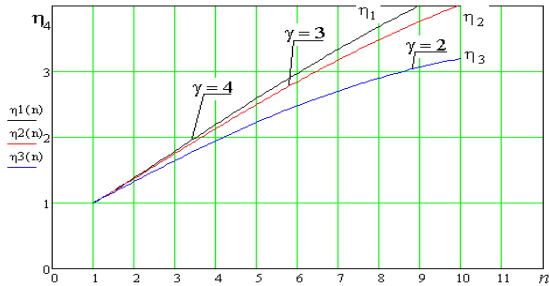


Рис. 21. Оцінка ефективності управління за критерієм – середня тривалість очікування початку обслуговування

де $T_{ож\ max}^{(0)}$ і $T_{ож\ min}^{(0)}$ – відповідно максимальний та мінімальний середні часи очікування пакетами обслуговування серед усіх черг у режимі без управління, $T_{ож\ max}^{(*)}$ і $T_{ож\ min}^{(*)}$ – відповідно максимальний та мінімальний середні часи очікування пакетами обслуговування серед усіх черг у режимі із оптимальним управлінням згідно із критерієм (43).

Для практичної реалізації управління обслуговуванням у вузлі ТКС у роботі запропоновано комплексний критерій – середній час затримки початку обслуговування ($\bar{T}_{задерж}$), який враховує імовірність відмови ($P_{отк}$), середню тривалість очікування початку обслуговування у черзі ($\bar{T}_{ож}$), середню тривалість інтервалу від моменту відмови в обслуговуванні до моменту повернення (\bar{T}_0). Аналітичне співвідношення для критерію має вигляд:

$$\bar{T}_{задерж} = \bar{T}_{ож} + \frac{\bar{T}_0 P_{отк}}{1 - P_{отк}}. \quad (47)$$

Управління нестационарними вхідними потоками полягає у використанні інтервального, кусочно-постійного управління. При цьому цикл відновлення обрано так, щоб максимальне відхилення інтенсивностей вхідних потоків від відповідних середніх у межах циклу значень не перевершувало значення:

$$\max_j \max_{T_0} \max_{0 \leq t \leq T_0} \left(\lambda_j(t) - \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} \lambda_j(t) dt \right) \leq \varepsilon, \quad (48)$$

якому має задовольняти шукане значення періоду відновлення T_0 .

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-технічну проблему розвитку теорії телеграфіка для систем, які функціонують в умовах реальних потоків вимог та процесу обслуговування, за рахунок розширення наукової бази моделей і методів аналізу та прогнозування трафіка, який являє собою суперпозицію немарківських потоків, у багатоканальних вузлах телекомунікаційних мереж та розробки методів

управління чергами, що настроюються, з метою підвищення загальносистемних показників якості обслуговування QoS (затримка пакета у вузлі, рівень втрат пакетів). Розвиток теорії телетрафіка базується на комплексі розроблених і вдосконалених методів розщеплення багатокомпонентних потоків, марківського наближення трафіка, моделей нестационарного та неординарного трафіка, моделей багатоканальних вузлів мереж із пріоритетами потоків та методів управління обслуговуванням черг. Отримано наступні науково-технічні та практичні результати:

1. Проведений аналіз структури трафіка в реальних телекомунікаційних мережах показав, що потоки пакетів даних мають специфічну властивість самоподоби, характерною рисою якої є довгострокова залежність процесу, який спостерігають на якому-небудь інтервалі, від значень цього процесу на попередніх інтервалах. Побудовано імітаційну модель вузла маршрутизації із самоподібним вхідним потоком з метою аналізу впливу параметра самоподоби вхідного потоку і його інтенсивності на основні характеристики системи обробки пакетів (довжина черги, час затримки, імовірність відмови). Показано, що ці характеристики в реальних ситуаціях за рахунок самоподоби погіршуються в 10 разів і більше.

2. Одержали подальший розвиток технології аналізу неоднорідного потоку на вході вузла ТКС. Показано, що цей потік може бути розщеплений на елементарні складові. Введено вирішальне правило, що забезпечує розщеплення потоку. Запропоновану процедуру використано для випадку, коли в якості складових композиційного потоку обрані розподіли Ерланга. Оцінено стохастичні параметри складових для двох- і трикомпонентних потоків.

3. Вперше запропоновано метод побудови марківської моделі неоднорідного немарківського трафіка шляхом вкладення потоку Ерланга в пуасонівський потік. Показано, що для немарківської системи, до входу якої надходить суперпозиція потоків Ерланга, може бути побудовано еквівалентний марківський ланцюг з багатомірною множиною станів. Показано, що для реального трафіка у вузлі телекомунікаційної мережі припустима безпосередня апроксимація марківськими потоками. При цьому похибка апроксимації становить 10-12%.

4. Вперше запропоновано метод оцінки ефективності функціонування телекомунікаційної мережі з неординарним груповим вхідним потоком. Отримано співвідношення для розрахунків розподілу ймовірностей станів системи для довільного розподілу кількості пакетів у групі. При цьому показано, що для одноканальної системи передачі ймовірність обслуговування не залежить від характеру розподілу кількості пакетів у групі, а визначається тільки його середнім значенням.

5. Удосконалено аналітичну модель опису закону зміни у часі інтенсивності нестационарного трафіка, який являє собою суперпозицію сезонних, тижневих і добових гармонійних складових, параметри яких відшукуються шляхом обробки реальних даних за методом найменших квадратів. Похибка моделі не перевищує 4%.

6. Вперше запропоновано метод аналізу напівмарківської системи високої розмірності з використанням технології фазового укрупнення станів та

удосконалено за рахунок більш обґрунтованого вибору початкового розподілу ймовірностей станів, а також використання більш ефективної процедури розрахунку проміжних розподілів ймовірностей. Показано, що метод фазового укрупнення станів напівмарківських моделей ТКС дозволяє суттєво знизити розмірність задачі шляхом її декомпозиції. Зокрема, вихідна задача розмірності $n_1 \times n_2$ перетворюється до послідовності n_1 задач розмірності n_2 . З використанням методу фазового укрупнення проведено оцінку ефективності функціонування мережі в умовах неоднорідного за критеріями вхідного потоку. Вироблено рекомендації зі способу укрупнення станів, які знижують кількість ітерацій до спрацьовування критерію останову в порівнянні з базовою процедурою у 5 разів для розмірності задачі порядку 10^3 та у 7 разів для порядку 10^4 .

7. Для марківського ланцюга надвисокої розмірності запропоновано ієрархічну процедуру фазового укрупнення станів, яку реалізовано у ситуації, коли процес переходів у системі управляється напівмарківським процесом. Процедуру застосовано для задач, у яких кількість станів має порядок $10^5 - 10^6$.

8. Побудовано математичні моделі вузлів маршрутизації ТКС для інтерфейсу вузла мережі з неоднорідним вхідним потоком пакетів без пріоритетів, інтерфейсу вузла мережі з неоднорідним вхідним потоком пакетів з абсолютним пріоритетом, багатоканального вузла маршрутизації з неоднорідним вхідним потоком пакетів з абсолютним пріоритетом, вузла мережі з неоднорідним вхідним потоком пакетів з відносним пріоритетом, вузла мережі з повторною передачею пакетів. Розроблено наближену технологію оцінки якості обслуговування багатоканальних вузлів маршрутизації з відмовами та неоднорідним вхідним трафіком із пріоритетами. Похибка процедури склала 9%.

9. Одержали подальший розвиток методи управління ресурсами вузлів маршрутизації ТКС:

– Вперше для багатоканальної системи з обмеженням по довжині черги та заданою інтенсивністю вхідного потоку отримано співвідношення для розрахунків щільності розподілу тривалості роботи системи до потрапляння у критичний стан. Це співвідношення разом із щільністю розподілу тривалості впливу пікового навантаження використано для визначення ймовірності того, що за час існування пікового навантаження довжина черги не досягне критичної.

– Вперше запропоновано процедуру розрахунків мінімаксного управління обслуговуванням черг вузла, яка встановлює розподіл ресурсу процесора, що мінімізує максимальну з ймовірностей того, що довжина відповідної черги перевищить критичну. Показано, що характер розподілу ресурсу не залежить від значення критичної довжини черги.

– Вперше запропоновано метод раціонального розподілу ресурсу процесора вузла ТКС для випадку, коли має місце відмінність у пріоритетах пакетів у різних чергах. Вирішено наступні задачі: максимізація середньозваженої кількості черг, довжина яких не перевищує критичну; мінімізація максимальної зваженої довжини черги; мінімізація максимальної тривалості очікування початку обслуговування;

мінімізація імовірності того, що довжина максимальної із черг перевищить критичну.

10. Розроблено, протестовано і впроваджено комплекс програмно-технічних засобів діагностики та управління трафіком у вузлах телекомунікаційних мереж, що реалізує розроблену в дисертації науково-технічну базу методів управління потоками пакетів даних. Програмний код написано мовою програмування Java (J2EE) з використанням бази даних MySQL. Використання програмного продукту дозволило підвищити показники якості обслуговування: надійність передачі даних (рівень втрат пакетів) на 7% і продуктивність (час очікування обслуговування пакетом) вузла мережі на 5%. Впровадження результатів роботи підтверджується актами.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Пустовойтов П.Е. Анализ многоканальных компьютерных сетей с неоднородным по приоритету входным потоком заявок [Текст] / Л.Г. Раскин, П.Е. Пустовойтов, Са'ди Ахмад Абдельхамид Саед Ахмад // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: ХарДАЗТ, 2005. – №1,2. – С.45-49.

2. Пустовойтов П.Е. Оценка эффективности многоходовых компьютерных сетей методами фазового укрупнения состояний [Текст] / П.Е. Пустовойтов, Са'ди Ахмад Абдельхамид Саед Ахмад // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2005. – №19. – С.101-104.

3. Пустовойтов П.Е. Оптимизация параметров фазовой декомпозиции марковских систем высокой размерности [Текст] / О.В. Серая, П.Е. Пустовойтов, Са'ди Ахмад Абдельхамид Саед Ахмад // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології. – Харків: НАКУ «ХАІ», 2005. – №27. – С. 175-178.

4. Пустовойтов П.Е. Применение теории марковских процессов в исследовании эффективности компьютерных сетей [Текст] / П.Е. Пустовойтов, Са'ди Ахмад Абдельхамид Саед Ахмад // Математичне моделювання. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2005. – №1,2. – С.100-102.

5. Пустовойтов П.Е. Оценка эффективности полумарковских компьютерных сетей высокой размерности [Текст] / Л.Г. Раскин, П.Е. Пустовойтов, Са'ди Ахмад Абдельхамид Саед Ахмад, Эль Саед Абделаал Эльсаед Мохамед // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2005. – № 56. – С.17-21.

6. Пустовойтов П.Е. Управляемая марковская цепь – модель корпоративной компьютерной сети [Текст] / П.Е. Пустовойтов, Са'ди Ахмад Абдельхамид Саед Ахмад, Эль Саед Абделаал Эльсаед Мохамед // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2005. – № 55. – С.167-171.

7. Пустовойтов П.Е. Оценка эффективности компьютерной сети с потоком групповых заявок и неограниченной очередью [Текст] / Л.Г. Раскин, П.Е. Пустовойтов, Эль Саед Абделаал Эльсаед Мохамед // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2005. – № 59. – С.26-31.

8. Пустовойтов П.Е. Марковская аппроксимация немарковских систем [Текст] / Л.Г. Раскин, П.Е. Пустовойтов, Са'ди Ахмад Абдельхамид Саед Ахмад // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: ІКСЗТ, 2006. – №1. – С.57-60.

9. Пустовойтов П.Е. Оценка эффективности системы массового обслуживания с пуассоновским входящим потоком и немарковским обслуживанием [Текст] / П.Е. Пустовойтов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2006. – №19. – С.93-98.

10. Пустовойтов П.Е. Анализ информационной гарантируемости компьютерных сетей [Текст] / Л.Г. Раскин, О.В. Серая, П.Е. Пустовойтов // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – Харків: НАКУ «ХАІ», 2006. – №6. – С. 11-14.

11. Пустовойтов П.Е. Динамическая маршрутизация в компьютерных сетях высокой размерности [Текст] / П.Е. Пустовойтов, Н.И. Ящук // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: ІКСЗТ, 2006. – №3. – С.68-71.

12. Пустовойтов П.Е. Методика обоснования требований к техническим характеристикам узла компьютерной сети для обеспечения информационной гарантированной безопасности [Текст] / П.Е. Пустовойтов, Эль Саед Абделаал Эльсаед Мохамед // Відкриті інформаційні та комп'ютерні інтегровані технології. – Харків: НАКУ «ХАІ», 2006. – № 31. – С. 129-132.

13. Пустовойтов П.Е. Минимаксное управление дисциплиной обслуживания в компьютерных сетях [Текст] / П.Е. Пустовойтов, Эль Саед Абделаал Эльсаед Мохамед // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2006. – № 23. – С. 178-182.

14. Пустовойтов П.Е. Методика анализа многокомпонентных входных потоков в компьютерных сетях [Текст] / П.Е. Пустовойтов, Эль Саед Абделаал Эльсаед Мохамед // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2006. – № 40. – С. 157-164.

15. Пустовойтов П.Е. Гарантируемая технология маршрутизации в компьютерных сетях, устойчивая к нестабильности загрузки каналов [Текст] / П.Е. Пустовойтов, Н.И. Ящук // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – Харків: НАКУ «ХАІ», 2007. – №7. – С. 27-31.

16. Пустовойтов П.Е. Технология маршрутизации в компьютерных сетях с учетом динамики трафика [Текст] / П.Е. Пустовойтов, Н.И. Ящук // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2007. – №19. – С. 155-158.

17. Пустовойтов П.Е. Борьба с перегрузкой и рациональная организация очередей в компьютерных сетях [Текст] / П.Е. Пустовойтов, Н.И. Ящук // Системи управління навігації та зв'язку. – К.: ЦНД НУ, 2007. – Вип.4. – С.143-146.

18. Пустовойтов П.Е. Повышение эффективности функционирования управляемой марковской системы [Текст] / Л.Г. Раскин, П.Е. Пустовойтов, Н.И. Ящук // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: ІКСЗТ, 2008. – С. 92-95.

19. Пустовойтов П.Е. Логистика маршрутизации в компьютерной сети с учетом динамики занятости узлов [Текст] / О.В. Серая, П.Е. Пустовойтов // Системи управління навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ НУ, 2009. – Вип.2(10). – С.158-161.
20. Пустовойтов П.Е. Формирование самоподобного случайного процесса с заданными свойствами [Текст] / П.Е. Пустовойтов, Н.И. Ящук // Системи обробки інформації. – Харків:ХУПС, 2009. – Вип.3(77). – С.81-85.
21. Пустовойтов П.Е. Управление обслуживанием потоков с приоритетами в компьютерных сетях [Текст] / П.Е. Пустовойтов // Системи управління навігації та зв'язку. – К.: ЦНДІ НУ, 2010. – Вип.1(13). – С. 209-212.
22. Пустовойтов П.Е. Управление ресурсами узла компьютерной сети по критерию среднее число очередей, длина которых не ниже критической [Текст] / П.Е. Пустовойтов // Системи обробки інформації. – Харків:ХУПС, 2010. вип.5 (86). – С. 125-127.
23. Пустовойтов П.Е. Управление передачей пакетов в узле компьютерной сети, минимизирующее максимальную длину очереди [Текст] / П.Е. Пустовойтов // Системи управління навігації та зв'язку. –К.:ЦНДІ НУ, 2010.–Вип. 2(14).–С.228-231.
24. Пустовойтов П.Е. Обеспечение требуемого финального распределения вероятностей состояний в управляемой марковской системе [Текст] / П.Е. Пустовойтов // Системи управління навігації та зв'язку. – К.:ЦНДІ НУ, 2010. – Вип. 3(15). – С.236-239
25. Пустовойтов П.Е. Эрланговская аппроксимация самоподобного случайного потока с заданными свойствами [Текст] / П.Е. Пустовойтов // Системи обробки інформації. – Харків:ХУПС, 2010. – Вип. 6(87). – С.150-152.
26. Пустовойтов П.Е. Стохастическая модель сетевого трафика [Текст] / П.Е. Пустовойтов // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків: УДАЗТ, 2010. – Вип.4/4(46). – С. 60-65.
27. Пустовойтов П.Е. Формирование самоподобного случайного потока на основе распределения Парето [Текст] / П.Е. Пустовойтов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: ІКСЗТ, 2010 №4. – С. 13-19.
28. Пустовойтов П.Е. Определение оптимального размера буфера онлайн-потока данных [Текст] / П.Е. Пустовойтов // Східно-Європейський журнал передових технологій. – Харків: УДАЗТ, 2010. – Вип. 5/2(47). С.48-50.
29. Пустовойтов П.Е. Исследование информационных потоков данных в телекоммуникационных сетях [Текст] / П.Е. Пустовойтов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. -№49. С128-132.
30. Пустовойтов П.Е. Одноканальная компьютерная сеть с неоднородным входным потоком заявок без приоритетов [Текст] / П.Е. Пустовойтов // Системи обробки інформації. – Харків:ХУПС, 2011. – Вип. 4(94). – С. 205-207.
31. Пустовойтов П.Е. Одноканальная компьютерная сеть с неоднородным входным потоком заявок с абсолютным приоритетом [Текст] / П.Е. Пустовойтов // Системи управління навігації та зв'язку. – К.:ЦНДІ НУ, 2011.–Вип. 2(18).-С.269-272.
32. Пустовойтов П.Е. Компьютерная сеть с неоднородным входным потоком заявок с относительными приоритетами [Текст] / П.Е. Пустовойтов // Східно-

Європейський журнал передових технологій. – Харків: УДАЗТ, 2011. – Вип. 3/2(51). – С. 43-46.

33. Пустовойтов П.Е. Приближенная технология оценки эффективности многоканальной компьютерной сети с отказами и неоднородным входящим потоком с приоритетами [Текст] / П.Е. Пустовойтов // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. – Харків: ІКСЗТ, 2011. – № 3. – С. 54-61.

34. Пустовойтов П.Е. Модель узла компьютерной сети с повторной передачей утерянных пакетов [Текст] / П.Е. Пустовойтов // Прикладная радиоэлектроника. – Харків: ХНУРЕ, 2012. – Т. 11, №1. – С. 87-90.

35. Пустовойтов П.Е. Анализ показателей надежности компьютерной сети для различных вариантов управления потоками пакетов [Текст] / П.Е. Пустовойтов, Р.А. Круглов, С.В. Судаков // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – №52(598). – С. 138-145.

36. Пустовойтов П.Е. Дисциплина обслуживания в мультисервисных сетях, минимизирующая максимальную задержку [Электронный ресурс] / П.Е. Пустовойтов, Л.Г. Раскин // Проблеми телекомунікацій. – 2013. – № 1 (10). – С. 66 - 71. – Режим доступа к журн.: http://pt.journal.kh.ua/2013/1/1/131_pustovoitov_discipline.pdf.

37. Пустовойтов П.Е. Методика анализа полумарковской системы высокой размерности [Текст] / Л.Г. Раскин, П.Е. Пустовойтов // Проблеми управління та інформатики. – 2013. – № 2. – С. 86–91.

38. Пустовойтов П.Е. Оптимизация порядка передачи сообщений в узлах компьютерных сетей с учетом динамики трафика [Текст] / П.Е. Пустовойтов, Л.Г. Раскин // Системні дослідження та інформаційні технології. — 2013. — №3. — С. 53–57.

39. А.с. №36461 від 10.01.2011, Україна, ДДІВ. Комп'ютерна програма «Сетевой программный комплекс учета медицинской статистики областной студенческой больницы» «ОСБ-МедСтат» / Пустовойтов П.Є.; Заявка №36666 від 09.11.2010.

40. А.с. №36636 від 21.01.2011, Україна, ДДІВ. Комп'ютерна програма «Сетевой программный комплекс медицинского центра ВУЗа» «МедПункт» » / Пустовойтов П.Є.; Заявка №36850 від 23.11.2010.

41. А.с. №39374 від 26.07.2011, Україна, ДДІВ. Комп'ютерна програма «Імітаційна модель комп'ютерної мережі із різними за властивостями потоками пакетів» / Пустовойтов П.Є.; Заявка №39622 від 23.05.2011.

Праці апробаційного характеру:

42. Пустовойтов П.Е. Применение теории марковских процессов в исследовании эффективности компьютерных сетей / П.Е. Пустовойтов, Са'ди Ахмад Абдельхамид Саед Ахмад [Текст] // Міждержавна науково методична конференція «Проблеми математичного моделювання». Тези доповідей. Дніпродзержинськ, 25-27 травня 2005р. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2005. – С.168.

43. Пустовойтов П.Е. Управление дисциплиной очередей в компьютерных сетях [Текст] / П.Е. Пустовойтов, Эль Саед Абделаал Эль Саед Мохамед //

Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Інтелектуальні системи прийняття рішень та інформаційні технології». – Чернівці: Рута, 2006. – С.280-281.

44. Пустовойтов П.Е. Построение марковских моделей систем с самоподобным входящим потоком [Текст] / П.Е. Пустовойтов, Л.Г. Раскин // Проблемы информатики і моделювання. Тези 8-ї міжнародної науково-технічної конференції (Харків, 26–28 листопада 2008р). – Харків: НТУ "ХПІ", 2008. – С.4.

45. Пустовойтов П.Е. Методика анализа трафика информационно-коммуникационных сетей [Текст] / П.Е. Пустовойтов // Тези доп. Науково-практичної конференції «Сучасні проблеми телекомунікацій - 2010», (28-30 жовтня). – Львів: НУ «Львівська політехніка», Укртелеком, 2010. – С.49-50.

46. Пустовойтов П.Е. Компьютерные сети, как системы массового обслуживания [Текст] / П.Е. Пустовойтов // Информационные технологии в управлении сложными системами: Сборник докладов научной конференции (Днепропетровск, 24 июня 2011). – Днепропетровск: изд-во «Свидлер А.Л.», 2011. – С.358-362.

47. Пустовойтов П.Е. Генерирование эмпирической случайной величины при моделировании трафика в компьютерной сети [Текст] / П.Е. Пустовойтов // Проблемы информатики і моделювання. Тези одинадцятої міжнародної наук.-техн. конф. (Харків-Ялта, 26–30 вересня 2011). – Харків: НТУ "ХПІ", 2011. – С. 62-63.

48. Пустовойтов П.Е. Управление потоками пакетов в маршрутизаторах с учетом равенства средних продолжительностей ожидания обслуживания [Текст] / П.Е. Пустовойтов // 16-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». 17–19 апреля 2012. Сб. материалов форума. Т.4. – Харьков: ХНУРЭ, 2012. – С.212–213.

49. Пустовойтов П.Е. Моделирование фрактальных потоков пакетов в компьютерных сетях [Текст] / П.Е. Пустовойтов // Сучасні інформаційні системи та технології «AIST-2012»: тез. допов. міжнар. наук.-практ. конф. 15-18 травня 2012р. – Суми, 2012. - С.29-30.

50. Пустовойтов П.Е. Управление дисциплиной очередей в маршрутизаторах по критерию максимальная длина очереди [Текст] / П.Е. Пустовойтов // Современные проблемы радиотехники и телекоммуникаций: материалы 8-й Международной молодежной научно-технической конференции «РТ-2012», Севастополь, 11-15 апреля 2012г. – Севастополь: СевНТУ, 2012. – С.120.

51. Пустовойтов П.Е. Управление очередями в роутерах по критерию среднее число очередей, длина которых не ниже критической [Текст] / П.Е. Пустовойтов // Системний аналіз. Інформатика. Управління (САІУ-2012): матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції (м. Запоріжжя, 14–16 березня 2012 року), КПУ. – Запоріжжя : КПУ, 2012. – С.243-244.

52. Пустовойтов П.Е. Влияние самоподобия потока пакетов данных на производительность узла компьютерной сети [Текст] / П.Е. Пустовойтов // Проблемы информатики і моделювання: Тез. дванадцятої Міжнародної наук.-техн. конф. (Ялта, 24–30 вересня 2012р). – Харків: НТУ "ХПІ", 2012. – С.73-74.

53. Пустовойтов П.Е. Расщепление двухкомпонентного потока пакетов в компьютерной сети: Тезисы докл. Межд. научн. конференции "Научная периодика

славянских стран в условиях глобализации" [Текст] / П.Е. Пустовойтов // Технологический аудит и резервы производства. – Харьков, 2012. – № 4/1(6). – С.13-14.

54. Pustovoitov P. Flow management in routers by criteria of average queue length / P. Pustovoitov // Proceedings of the XIth International Conference of Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science. TCSET'2012 Lviv – Slavske, 2012. – P.363.

55. Пустовойтов П.Е. Технология маршрутизации в компьютерных сетях с учетом динамики трафика [Текст] / П.Е. Пустовойтов // Системний аналіз та інформаційні технології: матеріали 14-ї Міжнародної науково-технічної конференції SAIT 2012, Київ, 24 квітня 2012 р. – К.: ННК «ІПСА» НТУУ «КПІ», 2012. – С.116-117.

АНОТАЦІЯ

Пустовойтов П.С. Моделі і методи аналізу немарківського трафіку у вузлах телекомунікаційних мереж. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2014.

У дисертаційній роботі розв'язується актуальна науково-технічна проблема розвитку теорії телетрафіка для систем, які функціонують в умовах реальних потоків вимог та процесу обслуговування, за рахунок вдосконалення теоретичної бази засобів аналізу немарківського трафіка у вузлах телекомунікаційних мереж на основі теоретичного розвитку та узагальнення моделей і методів забезпечення якості обслуговування за критеріями «надійність» і «продуктивність» та створення програмно-технічної бази та технологій управління чергами у вузлах телекомунікаційних мереж в умовах немарківського трафіка.

Одержали подальший розвиток методи розщеплення неоднорідного потоку, вхідний потік представлено у вигляді суперпозиції потоків Ерланга.

Вперше одержано метод побудови марківської моделі немарківської системи обслуговування з використанням потоку Ерланга, який вкладено у пуассонівський потік, що дозволяє оцінити ефективність системи, до входу якої надходить суперпозиція немарківських самоподібних потоків пакетів різної довжини.

Вперше для обліку неординарного потоку у телекомунікаційних мережах розроблено метод обчислення розподілу ймовірностей станів марківського ланцюга для групового вхідного потоку, який припускає довільний розподіл кількості пакетів у групі.

Удосконалено аналітичну модель, яка описує нестационарний стохастичний трафік у телекомунікаційних мережах, що враховує добові, тижневі та сезонні коливання навантаження.

Запропоновано метод фазового укрупнення станів напівмарківської системи, який дозволяє здійснювати розрахунок розподілу ймовірностей станів ланцюга надвисокої розмірності.

Одержали подальший розвиток методи розрахунку статистичних показників вузлів маршрутизації телекомунікаційних мереж, які враховують можливість

існування відмінностей у пріоритетах одних потоків пакетів даних перед іншими. Запропоновано моделі з абсолютним і відносним пріоритетами пакетів;

Одержали подальший розвиток методи управління обслуговуванням черг у вузлах маршрутизації, які встановлюють раціональний розподіл ресурсу обробки за сукупністю критеріїв, які покращують показники QoS.

Розроблено і впроваджено комплекс програмно-технічних засобів діагностики та управління трафіком телекомунікаційних мереж. Впровадження розробленої технології підвищило надійність передачі даних у вузлах маршрутизації на 7% і продуктивність на 5%, що підтверджується актами впровадження.

Ключові слова: телекомунікаційна система, вузол маршрутизації, якість обслуговування, управління трафіком, надійність та продуктивність мережі.

АННОТАЦІЯ

Пустовойтов П.Е. Модели и методы анализа немарковского трафика в узлах телекоммуникационных сетей. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.12.02 – телекоммуникационные системы и сети. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, 2014.

В диссертационной работе решается актуальная научно-техническая проблема развития теории телетрафика для систем, функционирующих в условиях реального потока требований и процесса обслуживания, за счет расширения теоретической базы средств анализа немарковского трафика в узлах телекоммуникационных сетей на основе теоретического развития и обобщения моделей и методов обеспечения качества обслуживания по критериям «надежность» и «производительность» и создания программно-технической базы средств управления обслуживанием очередей в узлах телекоммуникационных сетей в условиях немарковского трафика.

Показано, что пуассоновская модель трафика, которая использовалась при проектировании сетевых протоколов, не учитывает свойств последствия и самоподобия. Реальные системы обслуживания являются немарковскими и не подчиняются какому-то определенному закону. Поэтому анализ немарковских систем представляет большой научный и практический интерес.

Получил дальнейшее развитие метод расщепления неоднородного трафика на составляющие, позволяющий представить входящий поток в виде суперпозиции потоков Эрланга.

Впервые предложен метод построения марковской модели немарковской системы обслуживания с использованием потока Эрланга, вложенного в пуассоновский поток, позволяющий оценить эффективность системы, на вход которой поступает суперпозиция немарковских самоподобных потоков пакетов разной длины.

Впервые для учета неординарного потока пакетов в телекоммуникационных сетях разработан метод вычисления распределения вероятностей состояний марковской цепи для группового входящего потока, который в отличие от известных предполагает произвольное распределение числа пакетов в группе.

Улучшена аналитическая модель, описывающая нестационарный стохастический трафик в телекоммуникационной сети за счет учета суточных, недельных и сезонных колебаний нагрузки.

Предложен метод фазового укрупнения состояний полумарковской системы, позволяющий осуществить расчет распределения вероятностей состояний цепи сверхвысокой размерности.

Получили дальнейшее развитие методы расчета статистических показателей узлов маршрутизации телекоммуникационных сетей, учитывающие возможность существования различий в приоритетах одних потоков пакетов данных перед другими. Предложены модели с абсолютным и относительным приоритетами пакетов;

Получили дальнейшее развитие методы управления обслуживанием очередей в узлах маршрутизации, которые в отличие от известных, устанавливают рациональное распределение ресурса системы обработки по совокупности критериев: средняя длина очередей с учетом приоритетов, средняя продолжительность ожидания начала обслуживания, вероятность того, что длина максимальной из очередей не превысит критическую, среднее количество очередей, длина которых не ниже критической.

Разработан, протестирован и внедрен комплекс программно-технических средств диагностики и управления трафиком телекоммуникационных сетей, реализующий разработанную в диссертации научно-техническую базу моделей и методов управления потоками пакетов данных. Программный код написан на языке программирования Java (J2EE) с использованием базы данных MySQL. Использование программного продукта позволило повысить надежность передачи данных на 7% и производительность узла сети на 5%, что подтверждается актами о внедрении.

Ключевые слова: телекоммуникационная система, узел маршрутизации, качество обслуживания, управление трафиком, надежность и производительность сети.

ABSTRACT

Pustovoitov P.E. Models and methods of non-markov traffic analysis in telecommunication network nodes. – Manuscript.

Dissertation for doctor's degree of technical science in a specialty 05.12.02 – telecommunication systems and networks. – Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, 2014.

The dissertation is devoted to the research of theoretical bases for providing quality of service in the implementation of non-markov traffic analyses and dynamic traffic routing control in the telecommunication network (TCN) based on their dynamic models, markov approximations, technology of overcoming the task high dimension, imitation models and invented criteria and methods of traffic streams control.

It was developed a complex of program-technical facilities for traffic diagnostic and management in TCN, which realizes the scientific and technical base of models and

methods of packages stream management. A program code is built in Java (J2EE) using MySQL database. The usage of developed software allowed to promote reliability of communication on 7% and the productivity of network router on 5%.

Keywords: telecommunication system, routing hub, quality of service, traffic management, productive networks.