

ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ЗВ'ЯЗКУ ім. О.С. ПОПОВА

ЛОЖКОВСЬКИЙ АНАТОЛІЙ ГРИГОРОВИЧ

УДК 621.395

**АНАЛІЗ І СИНТЕЗ СИСТЕМ РОЗПОДІЛУ ІНФОРМАЦІЇ
В УМОВАХ МУЛЬТИСЕРВІСНОГО ТРАФІКА**

05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Одеса – 2010

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Одеській національній академії зв'язку ім. О.С. Попова
Міністерства транспорту та зв'язку України

Науковий консультант:

доктор технічних наук, професор
Захарченко Микола Васильович,
Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,
проректор з навчальної роботи

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Ящук Леонід Омелянович,
Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,
професор кафедри мереж і систем поштового зв'язку

доктор технічних наук, професор
Климаш Михайло Миколайович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
завідувач кафедри телекомунікацій

доктор технічних наук, професор
Савченко Юлій Григорович, Національний технічний
університет України «Київський політехнічний інститут»,
професор кафедри звукотехніки та реєстрації інформації

Захист відбудеться _____._____ 2010 р. о 10 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.816.02, Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова, вул. Ковальська, 1, 65029, м. Одеса.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Одеської національної академії зв'язку ім. О.С. Попова, вул. Ковальська, 1, 65029, м. Одеса.

Автореферат розісланий _____._____ 2010 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради, д.т.н.

Т.А. Цалієв

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Науково обґрунтоване планування й оптимізація телекомунікаційних систем та мереж, які забезпечують надання запитуваних послуг із заданими показниками якості обслуговування, є дуже складною науково-технічною й економічною проблемою, без вирішення якої неможливе створення інформаційної інфраструктури, що відповідає потребам розвинутого суспільства. В розвитку бізнесу окремих телекомунікаційних компаній цей фактор є найважливішим при обґрунтуванні дій адміністрації, спрямованих на підвищення ефективності роботи мережі і якості обслуговування користувачів.

Вирішення даної проблеми ґрунтується на розв'язанні задач аналізу і синтезу телекомунікаційних систем. Аналіз – це отримання і порівняння реальних характеристик якості функціонування системи із проектними та надання об'єктивних оцінок, які дозволять встановити причини зниження якості обслуговування і видати рекомендації з усунення цих причин. Синтез – це визначення структурних параметрів системи при заданих потоках, дисципліні і якості обслуговування. Комплексне розв'язання наведених задач дозволяє оптимізувати структуру мережі на тривалу перспективу. За умов розвитку телекомунікацій у відповідності до основних положень концепції мереж наступного покоління *NGN (Next Generation Networks)*, які забезпечують надання необмеженого набору послуг із заданими характеристиками якості обслуговування *QoS (Quality of Service)*, зазначені питання стають ще більш актуальними. Обрана технологія розподілу інформації в *NGN* визначає ступінь складності вузлів комутації, що, безумовно, впливає на якість обслуговування обміну інформацією між терміналами користувачів. Крім того, якість обслуговування потоків інформації впливає й на самі характеристики передачі інформації (наприклад, затримки пакетів IP-телефонії призводять до зниження якості телефонного зв'язку). Таким чином, розширення спектру надаваних послуг та зростаюча складність телекомунікаційних систем і мереж вимагає вирішення проблеми розробки адекватних методів аналізу і синтезу цих систем з метою отримання достовірних оцінок їх характеристик, реалізації задач їх оптимізації щодо обраного критерію якості обслуговування та розробки відповідних алгоритмів керування ними.

Процеси функціонування мереж та систем зв'язку можна представити тією чи іншою сукупністю систем масового обслуговування (СМО), для яких визначаються характеристики *QoS*. Одним із класів СМО в телекомунікаціях є системи розподілу інформації (СРІ), до яких належать мережі зв'язку в цілому або окремі комутаційні вузли чи, наприклад, пакетні комутатори, що обслуговують за певним алгоритмом повідомлення телекомунікаційних служб. Кількісна сторона процесів обслуговування потоків повідомлень (трафіка) у СРІ є предметом теорії телетрафіка. Ця теорія сформувалася як самостійна наукова дисципліна і являє собою набір імовірнісних методів вирішення проблем проектування нових та експлуатації діючих систем телекомунікацій.

Заснування теорії телетрафіка розпочато з наукових праць Ерланга А.К. (визначні *B-* і *C-*формула Ерланга). Її розвивали такі вчені, як *Burce P.J., Crommelin C. D., Kleinrock L., O'Dell G.F., Palm C., Pollaczek F., Wilkinson R.I.*

Суттєвий вклад в розвиток теорії телетрафіка внесли представники російської наукової школи: Хінчин А. Я., Башарин Г.П., Лівшиць Б.С., Харкевич А.Д., Севаст'янов Б.А., Нейман В.І, Степанов С.М., Гольдштейн Б.С., Соколов М.О., Мейкшан В.І. та академіки АН України Гніденко Б.В., Коваленко І.М., Королюк В.В. Здобутком теорії є підручники і наукові роботи Шнепса М.А., Корнишева Ю.М. та інших.

За теорією телетрафіка розробляються науково обгрунтовані методи оцінки характеристик якості обслуговування, причому понад усе враховується стохастичний характер трафіка. Основним змістом цієї теорії є дослідження пропускну здатності СРІ, яка тісно пов'язана з оцінкою показників якості обслуговування трафіка та вимагає обліку багатьох факторів.

Теорія телетрафіка оперує не із самими СРІ, а з їхніми математичними моделями. Різноманіття видів та топологій мереж, структур систем та способів виділення мережного ресурсу для обслуговування трафіка вимагає розробки моделей, які враховують ще й реальний характер потоків повідомлень і деталі обслуговування мультисервісного трафіка різних комунікаційних додатків (мова, відео, дані). Через те неможливо побудувати єдину модель, яка б давала відповіді на всі питання стосовно функціонування нових мереж зв'язку. Саме на основі застосовуваних моделей СРІ розробляються методи оцінки характеристик *QoS*, достовірність яких залежить від адекватності моделі реальній ситуації, що може виникнути при проектуванні та експлуатації.

Оцінка якості обслуговування трафіка є одним із найважливіших наукових напрямів в дослідженнях телекомунікаційних мереж. На цьому базується продумана та цілеспрямована стратегія модернізації сучасних мереж на етапі їх конвергенції та заміни технології комутації каналів на комутацію пакетів. Принципи функціонування мережі обумовлені режимами переносу інформації, а якість обслуговування – реальним характером трафіка. За цих обставин необхідна розробка нових методів аналізу і синтезу СРІ, що адекватно віддзеркалюють реальні процеси обміну інформацією в мережі. Це надасть подальший розвиток теорії телетрафіка та збагатить практичний інструментарій середовища проектування інфокомунікаційних мереж, що в свою чергу дозволить забезпечити відчутну економію витрат на будівництво та експлуатацію мереж зв'язку України. Завдяки більш точним розрахункам підвищиться якість обслуговування й пропускна здатність СРІ. Нові методи оцінки характеристик *QoS* необхідні в системах динамічного керування мережами для перерозподілу їх ресурсів та оптимізації трафіка і мережі в цілому на основі заданої (нормованої) якості обслуговування.

Таким чином, при системному підході до проблеми планування й оптимізації телекомунікаційних систем та мереж неможливо обійтися без математичних методів аналізу, синтезу та оцінки якості надання інформаційних послуг в умовах реальних потоків повідомлень. Відсутність таких методів призводить до прийняття неоптимальних рішень у процесі розробки, проектування й експлуатації телекомунікаційних систем, та мереж оскільки виникає різка невідповідність між очікуваними (проектними) показниками та реальною якістю обслуговування.

Стан науково-практичної проблеми. Телетрафік – це не тільки класичні телефонні повідомлення, але й потоки повідомлень у нових інфокомунікаційних мережах. Специфічні особливості різних СРІ збільшують проблеми розробки універсальних методів їх аналізу і синтезу. Особливо складна ця проблема для таких моделей трафіка, які є адекватними реальним процесам формування його потоків в мережі. Природа надходження потоків і їх обслуговування залежить від конкретного виду системи та мережі, структурного складу абонентів, спектру надаваних послуг та інших факторів.

В теорії телетрафіка розроблено низку математичних моделей і методів вирішення задач аналізу і синтезу СРІ для умов ідеалізованої пуассонівської моделі трафіка. Однак набір цих методів поки є недостатньо повним з погляду структурних особливостей реальних СРІ, дисциплін обслуговування і особливо характеру трафіка. Реальному трафіку сучасних мультисервісних мереж зв'язку властивий значно більший рівень нерівномірності інтенсивності навантажень, ніж це передбачено класичною моделлю пуассонівського потоку. Для таких моделей трафіка теорія телетрафіка не має відповідних методів розрахунку і на практиці оцінка характеристик якості обслуговування мультисервісних мереж зв'язку часто ведеться наближеними методами та засобами імітаційного моделювання. „Нерезультативність” існуючих методів полягає в тому, що вони орієнтовані на використання лише перших моментів розподілів випадкових величин, що визначають інтенсивність трафіка та функціонування СРІ. При обслуговуванні мультисервісного трафіка суттєвий вплив на характеристики *QoS* мають і вищі моменти розподілів названих величин, які визначають характер та ступінь нерівномірності трафіка.

Аналіз наукових публікацій показує, що багато теоретичних розробок не можливо використовувати на практиці. Це пов'язано із такими недоліками теоретичних досліджень, як: застосування математичного апарату, що не адекватно відображає процеси в телекомунікаційних мережах; невдалий вибір показників і критеріїв оцінки пропонованих рішень; спроба отримання аналітичних залежностей характеристик телекомунікаційних мереж в межах, де аналітичний апарат не працює; розробка методів, які, покращуючи один з параметрів телекомунікаційної системи, зрештою, знижують ефективність функціонування всієї системи в цілому; визначення закономірностей, у складі яких є початкові дані, одержати які не вбачається можливим.

З урахуванням значимості даної наукової проблеми можна констатувати, що проблема розвитку теорії телетрафіка шляхом її збагачення новими методами аналізу і синтезу систем розподілу інформації, які функціонують в умовах обслуговування мультисервісних потоків трафіка, є особливо актуальною в сучасних умовах конвергенції мереж та побудови на цій основі мереж нового покоління *NGN*.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Напрям дисертаційного дослідження пов'язаний з концепцією розвитку зв'язку України до 2010 року, затвердженою Постановою Кабінету Міністрів України № 2238 від 09.12.1999, і з завданнями „Переліку державних науково-технічних програм по пріоритетним напрямках розвитку науки і техніки України на 2006-2010

роки”, затвердженому Постановою Кабінету Міністрів України № 1716 від 24.12.2006.

В дисертації узагальнено й систематизовано результати наукової роботи, виконуваної безпосередньо автором в низці науково-дослідних робіт ОНАЗ ім. О.С. Попова. Основні результати дисертаційної роботи використано в таких госпрозрахункових НДР, які виконано на замовлення Державної адміністрації зв'язку України: „Розробка методики створення системи автоматизованого проектування (САПР) цифрових міських мереж електрозв'язку” (НДР № 5-1-98, державний реєстраційний номер 0198U007489, 2004 р.); на замовлення ВАТ „Укртелеком”: „Розроблення відомчих будівельних норм "Станційні споруди телефонних мереж"" (НДР № 240/117, державний реєстраційний номер 0102U001914, 2006 р.); „Розроблення "Правил технічної експлуатації цифрових систем комутації" для місцевих телефонних мереж”, (НДР № 902-244, державний реєстраційний номер 0104U009252, 2004 р.); „Розробка проекту концепції розвитку ВАТ “Укртелеком” до 2010 року” (НДР № 423-1822, державний реєстраційний номер 0105U007417, 2005 р.); „Розроблення корпоративних стандартів "Методика проектування мереж мультисервісного абонентського доступу на базі мідних кабелів" та "Методика проектування оптичних та радіомереж мультисервісного абонентського доступу"" (НДР № 343-1821, державний реєстраційний номер 0105U007118, 2005 р.); „Розробка корпоративного стандарту товариства "Спільноканальна сигналізація № 7. Контроль і тестування"" (НДР № 801821-402, державний реєстраційний номер 0107U006770, 2007 р.); „Розробка корпоративного стандарту товариства "Методика проектування мережі спільноканальної сигналізації № 7"" (НДР № 801821-403, державний реєстраційний номер 0107U006771, 2007 р.).

Мета і задачі дослідження. Дисертація присвячена вирішенню фундаментальної наукової проблеми – розробці нових методів аналізу і синтезу структурно-складних систем розподілу інформації, телекомунікаційних та інфокомунікаційних мереж, що функціонують в умовах мультисервісного трафіка. Засобом досягнення мети є вирішення наступних основних задач:

- аналіз моделей систем розподілу інформації та механізмів оптимізації їх пропускнуої здатності;
- аналіз методів теорії масового обслуговування, що використовуються для розрахунку систем розподілу інформації, та аналіз сфер їх застосування;
- аналіз статистичних характеристик потоків трафіка сучасних мереж зв'язку, побудованих за технологіями комутації каналів та пакетів;
- розробка нових методів оцінки характеристик QoS , адекватних моделі трафіка мереж зв'язку з однорідними потоками вимог;
- розробка нових методів оцінки характеристик QoS , адекватних моделі трафіка мультисервісних мереж з різнорідними потоками вимог;
- розробка нових методів оцінки характеристик QoS , адекватних моделі трафіка мультисервісних пакетних мереж зв'язку;
- розробка імітаційної моделі СРІ для обслуговування трафіка з різноманітними ймовірнісними законами розподілу його параметрів та

тривалості обслуговування вимог;

- статистичне моделювання, аналіз результатів і визначення оцінки точності результатів моделювання та точності запропонованих методів;
- дослідження впливу законів розподілу тривалості обслуговування на характеристики якості обслуговування в умовах мультисервісного трафіка;
- дослідження впливу явища самоподібності трафіка на пропускну здатність мультисервісної мережі зв'язку;
- дослідження ймовірно-часових параметрів мультисервісного трафіка та види їх розподілу.

Об'єкт дослідження – процеси надання мультисервісних послуг в мережах зв'язку.

Предмет дослідження – методи аналізу і синтезу систем розподілу інформації в умовах мультисервісного трафіка, що утворюється потоками вимог на надання телекомунікаційних послуг; якість обслуговування в умовах мультисервісного трафіка.

Методи дослідження. Дослідження дисертаційної роботи виконано із застосуванням теорії систем масового обслуговування, теорії телетрафіка та теорії ймовірностей. Для оцінки точності запропонованих рішень застосовано методи об'єктно-орієнтованого програмування та імітаційного моделювання з використанням методів математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів. Із запровадженням запропонованих рішень отримала подальший розвиток теорія телетрафіка, яку поповнено новими, вперше розробленими методами розрахунку якості обслуговування мультисервісного трафіка, що є основою аналізу і синтезу найбільш поширених в телекомунікаціях моделей систем розподілу інформації:

1. Для повнодоступної системи серверів (каналів, ліній) з очікуванням, представленою моделлю $M/D/m/\infty$, розроблено новий метод розрахунку якості обслуговування, в якому основні характеристики QoS моделі $M/D/m/\infty$ розраховуються по характеристикам моделі $M/M/m/\infty$ з використанням S -формули Ерланга та вперше отриманої апроксимуючої функції, яка залежить від ємності системи та інтенсивності навантаження. Даний метод зручний для комп'ютерного аналізу і значно простіший за метод Кроммеліна, за якого на практиці для інженерних розрахунків замість точних аналітичних формул застосовуються відповідні діаграми Кроммеліна.

2. Для симетричної пакетної мережі доступу, представленою моделлю $M_B/M/m$, розроблено новий рекурентний метод розрахунку пропускну здатності, який враховує можливість взаємозв'язку між джерелами трафіка в межах кластера мережі. Для забезпечення точності розрахунку виконуються для кожного автономного сегменту мережі доступу в цілому, не розділяючи його на окремі вузли доступу, які з'єднано каскадно. З метою спрощення синтезу мережі у випадку симетричного кластера використано макростани, що дозволило застосувати комбінаторні співвідношення. При цьому макростаном є множини станів кластера, в кожній з яких усі стани однаково ймовірні.

3. Вперше для повнодоступної системи серверів (каналів, ліній) з втратами, представленою моделлю $HM/D/m$, визначено функцію розподілу

стаціонарних імовірностей станів системи, яка враховує дисперсію інтенсивності навантаження. Гіперекспонентна (*НМ*) модель трафіка, як узагальнення ідеалізованої пуассонівської моделі, за своїми властивостям є адекватною до моделі трафіка мультисервісних мереж з різнорідними потоками вимог, а це дозволяє розраховувати характеристики функціонування таких систем більш точно.

4. Вперше для повнодоступної системи серверів (каналів, ліній) з втратами, представленою моделлю $HM/D/m$ і де рекурентний потік Пальма з гіперекспонентним розподілом інтервалу часу між вимогами призводить до нормального розподілу кількості вимог за умовну одиницю часу, розроблено новий метод розрахунку ймовірності втрати вимоги, який враховує скупченість інтенсивності навантаження або пікфактор трафіка.

5. Вперше для повнодоступної системи серверів (каналів, ліній) з чергою, представленою моделлю $HM/D/m/\infty$, розроблено новий ітераційний метод розрахунку характеристик якості обслуговування, який враховує збільшення інтенсивності навантаження та її стандартного відхилення, що утворюються за рахунок додаткового потоку вимог, який надходить до системи із черги. Метод заснований на апроксимації розподілу станів системи (серверів та черги) нормальним законом розподілу.

6. Вперше для односерверної моделі $fBM/G/1/\infty$ розроблено ентропійний метод оцінки характеристик якості обслуговування самоподібного трафіка, який зводиться до використання методів розрахунку відомих розподілів, ентропія яких співпадає або найбільш близька до ентропії станів системи при обслуговуванні самоподібного трафіка. Метод дає на порядок більш точні результати, ніж нині застосовувана формула Норроса для моделі $fBM/D/1/\infty$.

7. Для односерверної системи з чергою, представленою моделлю $G/M/1/\infty$, запропоновано метод оцінки характеристик якості обслуговування, який спирається на геометричний розподіл кількості вимог у СРІ в моменти надходження нових вимог, а не на розподіли, які не залежать від моменту прибуття вимоги до системи. У зв'язку з цим імовірність очікування не співпадає з імовірністю зайнятості системи, як за пуассонівського потоку, і розраховується із закону розподілу тривалості очікування в системі.

8. Для односерверної моделі з чергою $G/D/1/\infty$ за постійної тривалості обслуговування запропоновано наближений метод оцінки характеристик якості обслуговування, який ґрунтується на методі розрахунку моделі $G/M/1/\infty$ та наближеній оцінці різниці в часі очікування вимог в черзі та в системі.

9. Вперше для односерверної моделі з чергою $G/G/1/\infty$ встановлені всі функціональні співвідношення між характеристиками якості обслуговування, які дають можливість розраховувати будь-яку з характеристик QoS за наближеної оцінки хоча б однієї з них. Дана модель є узагальненням всіх інших односерверних моделей з необмеженою чергою.

10. Для мереж сигналізації СКС № 7 запропоновано новий метод оцінки продуктивності каналів сигналізації на мережному та транспортному рівнях еталонної моделі *OSI*, який може застосовуватись для мереж фіксованого зв'язку та з'єднань з мобільними і пакетними мережами передавання даних.

11. Для мереж мобільного зв'язку вперше розроблено метод розрахунку ймовірності відмови в наданні радіоканалу, який враховує не тільки дисперсію тривалості перебування мобільного абонента в межах дії однієї базової станції, а й дисперсію інтенсивності навантаження та вид закону розподілу тривалості сеансу зв'язку мобільного абонента.

Практичне значення отриманих результатів. Даними дослідженнями створено основи для:

- достовірного аналізу, синтезу і прогнозування якості функціонування сучасних СРІ в умовах обслуговування мультисервісного трафіка;
- пошуку оптимальних шляхів модернізації існуючих мереж зв'язку і підвищення якості надання телекомунікаційних послуг;
- прийняття обґрунтованих і взаємопов'язаних рішень при розробці високоефективної і надійної телекомунікаційної техніки нового покоління.

Для застосування отриманих результатів у практичній діяльності по розробці, плануванню й експлуатації телекомунікаційних систем всі теоретичні здобутки дисертації доведені автором до конкретних інженерних методик, алгоритмів та програм. Розроблені програмні засоби, моделі та інструментарії призначені для використання в дослідженнях (аналіз) та проектуванні (синтез) сучасних телекомунікаційних мереж.

Практично значущими результатами дисертаційної роботи є:

- оригінальне середовище проектування – комп'ютерна програма „Система автоматизованого проектування телекомунікаційних мереж”, яка призначена для виконання робочих проектів з будівництва та реконструкції телекомунікаційних мереж. Завдяки тому, що розрахункові алгоритми програми побудовано на основі запропонованих в дисертації нових методів аналізу і синтезу систем розподілу інформації, стає можливим вирішення задач оптимізації характеристик вартості і якості обслуговування проектованої мережі, яка функціонує в умовах реальних потоків трафіка;
- оригінальний інструментарій імітаційного моделювання – комп'ютерна програма „Моделювання систем масового обслуговування”, в якій методом імітаційного моделювання можна дати різноманітну кількісну оцінку ефективності систем розподілу інформації, що функціонують в умовах реальних моделей трафіка, порівняти способи підвищення пропускну здатності та покращення характеристик якості обслуговування і вибрати для них найбільш раціональні технічні рішення;
- оновлена навчальна дисципліна „Теорія масового обслуговування в телекомунікаціях” для студентів вищих навчальних закладів, які навчаються за напрямом „Телекомунікації”, до якої введено математичні моделі та методи аналізу і синтезу систем розподілу інформації, в яких враховано тип реального вхідного потоку, структуру системи розподілу інформації та дисципліну обслуговування. За новою програмою курсу видано підручник.

Практичні результати дисертаційної роботи впроваджено в нормативних стандартах ВАТ „Укртелеком” та навчальному процесі, що підтверджено відповідними актами.

Особистий внесок здобувача. Всі результати наукових, теоретичних і практичних досліджень, що викладені в дисертації, одержані автором особисто. У працях, опублікованих у співавторстві, дисертантові належать: [2] – розділ 9 та додаток; [13, 14, 19] – розробка методу розрахунку характеристик якості обслуговування; [10, 22] – аналіз властивостей телекомунікаційних мереж та розробка метода; [11, 35] – постановка задачі, розробка алгоритму та програмного коду програми імітаційного моделювання; [12] – постановка задачі, аналіз концепцій побудови і розвитку мереж NGN; [29] – формулювання концептуального напрямку роботи та теоретичні дослідження; [32] – постановка задачі, методика, алгоритми та програмний код програми автоматизованого проектування; [34, 36, 37, 40, 41, 43] – постановка задачі, аналіз методів розрахунку телекомунікаційних служб мультисервісних мереж.

Апробація результатів дисертації. Основні теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи було представлено на ряді міжнародних і всеукраїнських симпозиумах, науково-технічних конференціях, семінарах:

- VII та VIII міжнародні НПК „Системы и средства передачи и обработки информации”, Одеса, 2003, 2004;
- II та III міжнародні семінари „Информационные системы и технологии”, Одеса, 2004, 2005;
- міжнародна НПК „Сучасний стан, проблеми та перспективи розвитку телефонних мереж загального користування в Україні”, Київ, 2004;
- II міжнародний симпозиум „Телекоммуникации без границ”, Одеса, 2005;
- IX міжнародна конференція "Проблемы функционирования информационных сетей", Новосибірськ, 2006;
- III та IV міжнародні НТК „Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування”, Вінниця, 2007, 2009.
- The 2-nd International Conference „Telecommunication, Electronics and Informatics”, Chishinau, 2008.
- НМК „Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій”, Львів, 2009.
- НТК професорсько-викладацького складу Одеської національної академії зв’язку ім. О.С. Попова, 2003 – 2010.

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 44 наукових праці. З них: 1 – підручник, затверджений Міністерством транспорту та зв’язку України (одноосібно); 1 – нормативний документ ВБН України (у співавторстві); 23 – статті у фахових наукових виданнях, рекомендованих ВАК України для опублікування наукових праць здобувачів (16 одноосібно); 2 – свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір України (одноосібно); 17 – у матеріалах і тезах міжнародних симпозиумів, конференцій та семінарів.

Дисертаційна робота обсягом 267 сторінок складається зі вступу, семи розділів, висновків, списку використаних джерел із 150 найменувань на 8 сторінках, 2 додатків. Дисертація містить 25 ілюстрацій та 25 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі розкрито сутність і стан наукової проблеми та обґрунтовано її значущість, сформульовано мету і наукову новизну роботи, визначено практичну цінність і сферу застосування отриманих результатів, подано загальну характеристику роботи.

У першому розділі – „Моделі систем розподілу інформації та методи теорії масового обслуговування для їх аналізу і синтезу” – розглянуто загальні положення теорії телетрафіка, основні математичні моделі та типи систем розподілу інформації (СРІ) телекомунікаційних мереж, методи дослідження СРІ, фундаментальні результати історичного розвитку теорії телетрафіка, основні види служб телекомунікаційних мереж і нормування якості їх послуг.

Побудова математичної моделі, що адекватно відображує реальну СРІ в умовах різноманіття типів трафіка та топологій мереж, структур систем та способів виділення мережного ресурсу є складною задачею, а тому неможливо побудувати єдину модель та універсальні методи аналізу і синтезу СРІ.

Аналіз існуючих методів дослідження СРІ показує, що незважаючи на їх чисельність, абсолютно точні аналітичні результати отримано для невеликої кількості моделей СРІ. Наприклад, методи диференціальних і інтегральних рівнянь, додаткових змінних та додаткових подій, метод фаз Ерланга, ланцюги Маркова (Δt -метод), вкладенні ланцюги Маркова, кусочно-лінійні марковські процеси і напівмарковські процеси, дозволили вирішити задачі аналізу і синтезу СРІ тільки для моделей $M/G/m$, $M/M/m/\infty$, $M/M/m/r$, $M_B/M/m$, $M/D/m/\infty$, $M/G/1/\infty$. Ці класичні результати відображено в роботах Ерланга, Енгсета, Кроммеліна та Поллачека-Хінчина відповідно. Для інших систем, наприклад, узагальнюючої моделі $GI/G/m/\infty$, отримано часткові або наближені результати.

Сфера застосування зазначених методів визначається кількістю не експонентно розподілених величин, що характеризують поведінку елементів досліджуваної СРІ. Однак експонентні випадкові процеси властиві тільки пуассонівській моделі трафіка, яка не відповідає реальним потокам сучасних мультисервісних мереж зв'язку. Існуючі методи аналізу і синтезу СРІ орієнтовані на використання лише середніх значень випадкових величин, що характеризують трафік і систему. При обслуговуванні ж мультисервісного трафіка на характеристики QoS сильно впливає й ступінь нерівномірності зазначених величин, зокрема дисперсія інтенсивності навантаження.

Відчутне ускладнення математичних моделей СРІ сучасних мереж зв'язку не дозволяє для їх аналізу, синтезу і оптимізації застосовувати класичні методи дослідження, а це змушує використовувати наближені методи або методи статистичного моделювання у поєднанні з аналітичними методами.

Результати досліджень, наведених в розділі 1, опубліковано в роботах автора [1, 3, 12, 18, 26, 29, 33, 34, 38, 39, 44].

У другому розділі – „Математичні моделі трафіка сучасних телекомунікаційних мереж” – проаналізовано способи математичного опису потоків вимог у СРІ; представлено результати досліджень параметрів трафіка в мультисервісних мережах та математичну модель мультисервісного трафіка в пакетних мережах зв'язку.

Потоки вимог визначаються моментами надходжень t_x і кількістю вимог k_n , що надійшли у момент t_n . Випадковий потік описується функцією розподілу ймовірностей інтервалів часу між вимогами $P(z)$ або розподілу ймовірностей кількості вимог i за умовну одиницю часу $P_i(t)$. Якщо за умовну одиницю часу t взято середню тривалість обслуговування, то математичне сподівання кількості вимог i за одиницю часу t є інтенсивністю навантаження Λ .

Розвиток телекомунікаційних технологій, нові принципи побудови мереж зв'язку, зміна структурного складу абонентів і спектру надаваних послуг збільшують нерівномірність інтенсивності потоків вимог, яка вимірюється дисперсією σ^2 інтенсивності навантаження Λ . Результати статистичних вимірів параметрів трафіка дають змогу виділити три типи реального трафіка, до яких слід вживати певні математичні моделі: I тип – однорідний трафік; II тип – різнорідний трафік; III тип – пачковий трафік пакетних мереж.

Перший тип властивий моносервісним мережам зв'язку. В телефонних мережах із-за одиничності послуги передачі мовних повідомлень трафік є однорідним. В мультисервісних мережах в окремих сегментах мережі трафік теж може бути однорідним. Наприклад, у разі доступу абонентів з близькими питомими інтенсивностями навантаження тільки до частини послуг зі спектру надаваних сервісів, або окремими потоками пакетів IP-телефонії утворюється однорідний трафік. Такий трафік описується моделлю пуассонівського потоку з експонентним (M) розподілом інтервалів часу між вимогами і в якому значення інтенсивності навантаження Λ та його дисперсії σ^2 співпадають.

Другий тип властивий мультисервісним мережам зв'язку, де із-за інтегрального характеру мереж та розширеного спектру надаваних послуг трафік є різнорідним. Реальні потоки формуються множиною джерел з різною питомою інтенсивністю навантаження. В процесі створення спільного потоку вимог беруть участь джерела, що належать до тієї або іншої групи споживачів сервісів з близькими питомими інтенсивностями навантаження. Значення інтенсивності результуючого потоку в кожному мить залежить від того, до якої групи за інтенсивністю навантаження належить джерело і яке співвідношення чисельності цих джерел з іншими. Більш адекватно такий потік описується не експонентним розподілом інтервалів часу між вимогами, а їх сумішшю –

гіперекспонентним розподілом n -го порядку $P(z) = \sum_{i=1}^n p_i \lambda_i e^{-\lambda_i z}$ (доволі часто

апроксимація прийнятна вже за $n = 2$). Цим в моделі забезпечується більший розкид інтервалу часу між вимогами, за якого σ^2 перевищує Λ від одиниць до десятків разів. Співвідношення даних параметрів – це коефіцієнт скупченості навантаження або пікфактор трафіка $S = \sigma^2 / \Lambda$. Він визначає ступінь різниці моделей мультисервісного та пуассонівського трафіка. Гіперекспонентний розподіл інтервалу між вимогами призводить до нормального закону розподілу кількості вимог за середню тривалість їх обслуговування. Тому математична модель реальних потоків мультисервісних мереж – це гіперекспонентний потік вимог (HM) з нормальним розподілом інтенсивності навантаження Λ , за якого $S > 1$ (практичні виміри дають значення S в межах 2, ..., 15).

Третій тип властивий пакетним мережам зв'язку. Тут потоки пакетів формуються множиною джерел вимог на надавані мережею послуги і мережних додатків, що забезпечують послуги передачі відео, даних, мови й ін. Абоненти, які створюють потоки пакетів, істотно відрізняються між собою значеннями питомої інтенсивності навантаження, і тому трафік є теж різномірним, але ще й з довгостроковими залежностями в інтенсивності (наприклад, із-за повторної передачі невірних прийнятих пакетів) та з певними вимогами до QoS . Передачу потоків різних служб забезпечує єдина мережа з єдиними протоколами та законами управління. Оскільки джерела кожної служби можуть мати різні швидкості передавання інформації або змінювати її в процесі сеансу зв'язку, то об'єднаному потоку пакетів властива так звана «пачковість» трафіка (*burstness*), вимірювана коефіцієнтом пачковості. Ця пачковість обумовлює ще більшу нерівномірність трафіка, за якої σ^2 перевищує Λ вже від 15 до 60 разів і більше. Врахування для таких систем лише дисперсії інтенсивності навантаження є недостатнім для отримання надійних та точних результатів. Для „пачкового” трафіка застосовна модель самоподібного (*self-similarity*) процесу, яка із-за слабкої формалізованості ще не досліджена в повній мірі. У якості розподілів інтервалу часу між вимогами, що призводять до *самоподібних* процесів (*fBM*), вибираються розподіли з так званим „довгим хвостом”, тобто розподіли Парето, Вейбулла або логарифмічно нормальний закон.

Результати досліджень, що наведені в розділі 2, опубліковано в роботах автора [1, 19, 20, 24, 30, 36, 37, 40, 41].

У третьому розділі – „Методи аналізу і синтезу систем розподілу інформації в умовах однорідного трафіка” – розглянуто моделі трафіка, що утворюється потоками вимог до однотипних послуг, в окремих сегментах мультисервісної мережі або від невеликих груп абонентів. Розроблено метод розрахунку характеристик якості обслуговування моделі $M/D/m/\infty$ з чергою та рекурентний метод розрахунку пропускної здатності симетричної пакетної мережі доступу, яка може бути представленою моделлю $M_B/M/m$ з втратами.

Трафік утворюється потоками заявок до служб мережі на надання телекомунікаційних послуг, показники якості яких нормуються рекомендаціями ІТУ. Іноді необхідні й не нормовані характеристики QoS , які є важливими для детального аналізу функціонування СРІ, наприклад, з метою її оптимізації.

Для моделі $M/D/m/\infty$ за дисципліни черги *FIFO* є рішення Кроммеліна, в якому використано рівняння станів Фрая. Система рівнянь для кожного випадку розв'язується методом похідних функцій. Ці обчислення до того складні, що практично замість точних аналітичних формул застосовуються відповідні діаграми Кроммеліна. Тому для даної моделі розроблено новий метод розрахунку якості обслуговування, в якому основні характеристики QoS моделі $M/D/m/\infty$ розраховуються по характеристикам моделі $M/M/m/\infty$ з використанням *C*-формули Ерланга та вперше отриманої апроксимуючої функції, яка залежить від ємності системи та інтенсивності навантаження.

Встановлено, що величини середньої тривалості очікування в системі W за постійної (D) та експонентної (M) тривалості сервісу перебувають в такому співвідношенні:

$$W_{(D)} = W_{(M)} \cdot 2 \left(\frac{m}{m + \Lambda} \right)^2 = \frac{C_m(\Lambda)}{m - \Lambda} \cdot 2^1 \left(\frac{m}{m + \Lambda} \right)^2. \quad (1)$$

Множник до $W_{(M)}$ у (1) визначає, що при $\Lambda = m$ тривалість $W_{(D)} = W_{(M)} / 2$, тобто різниця у 2 рази, що відповідає такому ж результату за формулою Поллачека-Хінчина для системи $M/G/1/\infty$. Зі зростанням m ця різниця спадає і в широкому діапазоні зміни m та Λ точність оцінки (1) є не гіршою за $\pm 5\%$. З такою ж точністю визначено й співвідношення ймовірностей очікування за експонентної та постійної тривалості сервісу в моделях $M/M/m/\infty$ і $M/D/m/\infty$:

$$P_{w>0} = \frac{C_m(\Lambda)}{2 \cdot 2^0 \left(\frac{m}{m + \Lambda} \right)^1}, \quad (2)$$

де $P_{w>0}$ – імовірність очікування за постійної, а $C_m(\Lambda)$ – за експонентної тривалості обслуговування. Оскільки $P_{w>0} = W / t_q$, то з (1) і (2) маємо тривалість очікування вимог у черзі $t_{q(D)}$ за постійної тривалості сервісу:

$$t_{q(D)} = \frac{W_{(D)}}{P_{w>0}} = \frac{1}{m - \Lambda} \cdot 2^2 \left(\frac{m}{m + \Lambda} \right)^3. \quad (3)$$

З (1), (2) і (3) видно, що однойменні характеристики QoS в моделях $M/M/m/\infty$ і $M/D/m/\infty$ за експонентної та постійної тривалості обслуговування пов'язані між собою наступною апроксимуючою функцією:

$$F(k) = 2^{k-1} \left(\frac{m}{m + \Lambda} \right)^k, \quad (4)$$

де $k = 1, 2$ і 3 для характеристик $P_{w>0}$, $W_{(D)}$ та $t_{q(D)}$ відповідно, а отже апроксимуюча функція (4) дозволяє визначити характеристики QoS моделі $M/D/m/\infty$ через C -формулу Ерланга;

$$P_{w>0} = \frac{C_m(\Lambda)}{2 \cdot F(k)}, \quad W_{(D)} = \frac{C_m(\Lambda)}{m - \Lambda} \cdot F(k + 1), \quad t_{q(D)} = \frac{F(k + 2)}{m - \Lambda}.$$

При синтезі пакетних мереж NGN виникає проблема розрахунку пропускну здатності мереж ширококутового мультисервісного доступу. Типова структура кластера мережі доступу передбачає каскадне підключення вузлів доступу (ВД) і можливість взаємного зв'язку абонентів кластера. Вона містить, як правило, транзитний вузол доступу $ВД_1$ і каскадно підключені через нього $ВД_2 \dots ВД_m$. Вузлами доступу є мультиплексори ліній $xDSL$ ($DSLAM$), базові станції $WiMAX$ і/або $WiFi$ та інше обладнання. Для синтезу такої мережі необхідно визначити кількість умовних каналів так, щоб не перевищувалися нормативні втрати вимог, а потім визначити для кожного такого каналу швидкість передачі так, щоб не перевищувалися норми втрат пакетів, тоді визначимо необхідну смугу пропускання в Мбіт/с кожного напрямку зв'язку.

Трафік в кластерах із-за малої кількості абонентів (до 300) описується моделлю примітивного потоку (пуассонівського потоку другого роду). Для нього розподіл інтервалів між вимогами теж експонентний, але параметр λ пропорційний до кількості вільних джерел трафіка. Стани системи розподілені

за усіченим законом Бернуллі і тому модель потоку позначено як M_B .

Стани послідовно з'єднаних ВД залежні, тому що кожна вимога займає в них певну пропускну здатність. Для отримання точних результатів слід розраховувати кожний автономний сегмент мережі доступу з каскадним включенням ВД (кластер) у цілому, не ділячи його на окремі ВД.

Позначимо: $N_1, N_2 \dots N_m$ – ємності відповідних вузлів доступу; $R_1 \dots R_m$ – швидкості передачі для ВД₁... ВД_m; R – загальна швидкість передачі в напрямку до транспортної мережі від всіх вузлів доступу кластера; $v_1 \dots v_m$ – розрахункова кількість умовних каналів для ВД₁...ВД_m; V – розрахункова кількість умовних каналів для напрямку до транспортної мережі; α_1, α_2 – інтенсивність абонента у вільному стані відповідно усередині кластера та до транспортної мережі.

Позначимо $P(k_1, l_1; \dots; k_m, l_m)$ – імовірність наявності у ВД₁...ВД_m відповідно $k_1 \dots k_m$ з'єднань усередині кластера й $l_1 \dots l_m$ з'єднань до транспортної мережі. Для i -го ВД імовірність наявності $k_i + l_i$ з'єднань дорівнює:

$$\tilde{N}_{N_i}^{l_i} \alpha_2^{l_i} C_{N_i-l_i}^{k_i} \alpha_1^{k_i} p_0, \quad (5)$$

де p_0 – імовірність відсутності з'єднань.

Для симетричного кластера $N_i = N$ та $v_i = v$. Для всіх значень i ($0 \leq i \leq m$) введено множини станів кластера, у кожній з яких всі стани однаково ймовірні. Позначимо i_{kl} – кількість ВД, що мають по k з'єднань усередині кластера й по l з'єднань до транспортної мережі. Для окремо взятого ВД імовірність наявності $k + l$ з'єднань визначається формулою (5). Тоді ймовірність того, що із всіх ВД i_{00} мають по $k = 0$ і $l = 0$ з'єднань, i_{01} – по $k = 0$ і $l = 1$ з'єднань і так далі:

$$P(i_{00}, i_{01}, \dots, i_{v0}) = \frac{m!}{\prod_{k=0}^{v-l} \prod_{l=0}^v i_{kl}!} \prod_{l=0}^v \prod_{k=0}^{v-l} (C_N^l \alpha_2^l C_{N-l}^k \alpha_1^k)^{i_{kl}} \times P_0.$$

Імовірності макростанів кластера доступу описуються поліноміальним розподілом. Імовірність наявності j з'єднань ($0 \leq j \leq V$) від всіх m ВД у загальному напрямку $P_j = \sum_j P(i_{00}, i_{01}, \dots, i_{v0}) = B_j(m) P_0$. Представимо її добутком

імовірності наявності l з'єднань від певного ВД на ймовірність наявності $j - l$ з'єднань від інших $(m - 1)$ ВД і тому має місце рекурентне співвідношення:

$$B_j(m) = \sum_{l=0}^v \sum_{k=0}^{v-l} C_N^l \alpha_2^l C_{N-l}^k \alpha_1^k B_{j-l}(m-1). \quad (6)$$

З (6) отримано друге рекурентне співвідношення:

$$\begin{aligned} j B_j(m) &= \sum_j m \sum_{s=0}^v \sum_{r=0}^{v-s} s \frac{i_{rs}(m-1)!}{\prod_{k=0}^{v-l} \prod_{l=0}^v i_{kl}!} \prod_{l=0}^v \prod_{k=0}^{v-l} (C_N^l \alpha_2^l C_{N-l}^k \alpha_1^k)^{i_{kl}} = \\ &= m \sum_{s=1}^v \sum_{r=0}^{v-s} s C_N^s \alpha_2^s C_{N-s}^r \alpha_1^r B_{j-s}(m-1). \end{aligned}$$

яке після перетворень представлено так:

$$jB_j(m) = mN\alpha_2 \sum_{s=1}^v C_{N-1}^{s-1} \alpha_2^{s-1} B_{j-s}(m-1) \sum_{r=0}^{v-s} C_{N-s}^r \alpha_1^r.$$

Оскільки $\tilde{N}_{N-1}^s C_{N-s-1}^{v-s} = C_{N-1}^v C_v^s$, то більш зручнішим є співвідношення:

$$jB_j(m) = \frac{\alpha_2}{1 + \alpha_1} [(mN + j + 1)B_{j-1}(m) - mNC_{N-1}^v \sum_{l=0}^v C_v^l \alpha_2^l \alpha_1^{v-l} B_{j-1-l}(m-1)]. \quad (7)$$

З урахуванням формули Енгсета послідовно визначаються всі значення $B_j(m)$, за якими розраховуються характеристики QoS у кластері. Позначимо: P_i – імовірність зайнятості i умовних каналів для розглянутого ВД при зв'язку всередині кластера; Π_j – імовірність зайнятості j умовних каналів у напрямку до транспортної мережі; P_{ij} – імовірність одночасної зайнятості i умовних каналів для розглянутого ВД при зв'язку всередині кластера та j умовних каналів у напрямку до транспортної мережі. Дані характеристики QoS визначаються так:

$$P_i = \frac{\sum_{l=0}^i C_N^l \alpha_2^l C_{N-l}^{i-l} \alpha_1^{i-l} \sum_{j=0}^{v-l} B_j(m-1)}{\sum_{x=0}^v B_x(m)}, \quad \tilde{I}_j = \frac{B_j(m)}{\sum_{x=0}^v B_x(m)}, \quad P_{ij} = \frac{\sum_{l=0}^i C_N^l \alpha_2^l C_{N-l}^{i-l} \alpha_1^{i-l} B_{j-l}(m-1)}{\sum_{x=0}^v B_x(m)}.$$

Імовірність втрати вимоги P_B – це відношення інтенсивності потоків втрачених і вхідних вимог. Для ВД інтенсивність потоків вимог всередині кластера λ_κ та зовнішнього λ_ϵ відповідно дорівнюють:

$$\lambda_\epsilon = \sum_{i=0}^v \alpha_1 (N - i) P_i, \quad \lambda_\kappa = \sum_{i=0}^v \alpha_2 (N - i) P_i.$$

Втрати P_B для зв'язку всередині кластера і для зовнішнього зв'язку відповідно:

$$P_{B\epsilon} = \frac{\alpha_1 (N - v) P_v}{\lambda_\epsilon}, \quad P_{B\kappa} = \frac{\alpha_2 (N - v) P_v + \sum_{i=0}^{v-1} \alpha_2 (N - i) P_i}{\lambda_\epsilon}.$$

За формулою (7) розраховуються втрати вимог і відповідна їм пропускна здатність мережі мультисервісного доступу. Синтез мережі зводиться до визначення кількості умовних каналів так, щоб не перевищувалися нормативні втрати вимог, а потім визначається для кожного такого каналу швидкість передачі так, щоб не перевищувалися норми втрат пакетів, після чого визначається необхідна смуга пропускання в Мбіт/с кожного напрямку зв'язку.

Результати досліджень розділу 3 видано в роботах [1, 10, 16, 17, 42].

У четвертому розділі – „Методи аналізу і синтезу систем розподілу інформації в умовах неоднорідного трафіка” – розглянуто параметри мультисервісного трафіка, визначено функцію розподілу стаціонарних імовірностей станів системи $HM/D/m$. На основі цієї функції розроблено метод розрахунку імовірності втрат P_B і запропоновано апроксимацію для розрахунку імовірності P_B за будь-якого закону розподілу тривалості обслуговування, тобто для моделі $HM/G/m$. Для моделі з чергою $HM/D/m/\infty$ розроблено новий ітераційний метод розрахунку основних характеристик якості обслуговування.

Визначення характеристик QoS ґрунтується на імовірнісній функції розподілу станів системи P_j , де стан системи – це поточна кількість зайнятих

серверів j або вимог в системі. В моделі $HM/D/\infty$ вимоги обслуговуються без втрат і тому за постійної тривалості сервісу t властивості потоку звільнень серверів збігаються із властивостями потоку надходження вимог, бо має місце тільки зсув у часі на величину t між моментом надходження вимоги та моментом її виходу із системи. Стани системи повністю визначаються рисами потоку вимог, а імовірнісні функції розподілу кількості вимог у системі j і вхідної кількості вимог i за час t , збігаються. За нормального розподілу кількості вимог потоку розподіл P_i визначить функцію розподілу станів P_j :

$$P_i = P_j = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(i-\Lambda)^2}{2\sigma^2}}. \quad (8)$$

У разі обмеженої до m кількості серверів простір станів системи буде також обмеженим від 0 до m . В моделі $HM/D/m$ імовірнісна функція розподілу станів системи апроксимується усіченим нормальним законом, який визначає імовірності станів системи P_j в межах $0 \leq j \leq m$:

$$P_j = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \left[\frac{\int_0^{m-\Lambda} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} dt - \int_0^{0-\Lambda} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} dt}{\int_0^{m-\Lambda} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} dt - \int_0^{0-\Lambda} e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} dt} \right]^{-1} e^{-\frac{(j-\Lambda)^2}{2\sigma^2}}. \quad (9)$$

За умови $m = \infty$ значення (8) і (9) збігаються. На рис. 1 наведені графіки апроксимації розподілу станів системи з $m = 130$ та 150 при $\Lambda = 100$ Ерл, $\sigma^2 = 400$, тобто пікфактор $S = \sigma^2 / \Lambda = 4$.

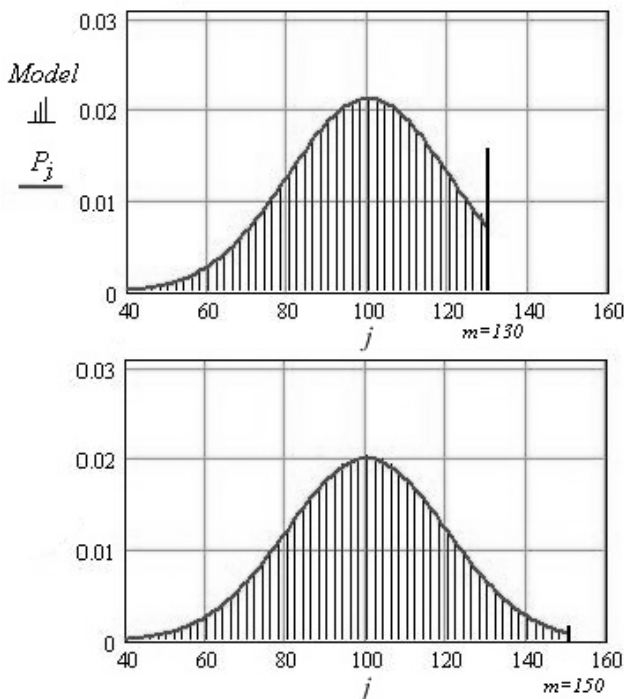


Рис. 1. Апроксимація станів системи

Імітаційним моделюванням перевірено точність апроксимації усіченим нормальним законом і за кожних Λ , σ^2 та m відносна похибка не перевищує 1% для всіх значень P_j , окрім $P_{j=m}$. Процес обслуговування вимог у системі є ергодичним або не залежить від початкового стану системи за умови $m > \Lambda$. Якщо m суттєво перевищує Λ , то початковий стан системи не дуже впливає на функцію розподілу станів системи. При зменшенні m початковий стан виявляє свій більший вплив саме на імовірність $P_{j=m}$. Це йде через „скупченість” реального трафіка, яка впливає з його властивості $\sigma^2 > \Lambda$. У випадках зайнятості всіх серверів системи, при звільненні будь-якого з серверів він тут же займається

черговою вимогою, яка в цей час надходить до системи через скупченість вимог на даному інтервалі часу, а це підтримує систему більш тривалий час у стані „насичення”, тобто у стані $P_{j=m}$ і дана ймовірність збільшується.

При $\sigma^2 = \Lambda$ закони Гаусса та Пуассона майже збігаються вже при $\Lambda > 20$. Тому усічений нормальний розподіл (9) дає значення ймовірностей станів системи, які з такою ж точністю співпадають зі значеннями, що отримуються за встановленим для цього випадку відомим розподілом Ерланга.

Ймовірність зайнятості всіх серверів системи $P_{j=m}$ визначає частку часу, на протязі якої є потенційна можливість втрати вимоги. Для пуассонівського потоку, де $\sigma^2 = \Lambda$ і $S = 1$, ймовірність $P_{j=m}$ співпадає з ймовірністю втрати вимоги P_B . За гіперекспонентного потоку, де $\sigma^2 > \Lambda$, з урахуванням вищенаведеного впливає, що ймовірність втрати вимоги P_B більше ймовірності зайнятості всіх серверів системи $P_{j=m}$ у S разів, тобто пропорційно коефіцієнту скупченості інтенсивності навантаження. Таким чином, ймовірність втрати вимоги P_B визначиться шляхом множення (9) для стану $j = m$ на S і остаточно отримуємо:

$$P_B = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(m-\Lambda)^2}{2\sigma^2}} \sigma^2}{\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{m-\Lambda}{\sigma}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{\Lambda}{\sigma}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt} \frac{\sigma^2}{\Lambda}. \quad (10)$$

Значення густини нормального розподілу та функцій Лапласа (інтеграл ймовірності), що використовуються в чисельнику та знаменнику формули (10) відповідно, широко наведено в математичних довідниках.

Графіки залежності ймовірності втрат викликів від ємності системи та коефіцієнта скупченості S наведено на рис. 2. В даному прикладі всі графіки відповідають інтенсивності навантаження $\Lambda = 100$ Ерл. Пунктирна крива $E_m(\Lambda)$ подає залежність ймовірності втрат від m , розрахованих за формулою Ерланга.

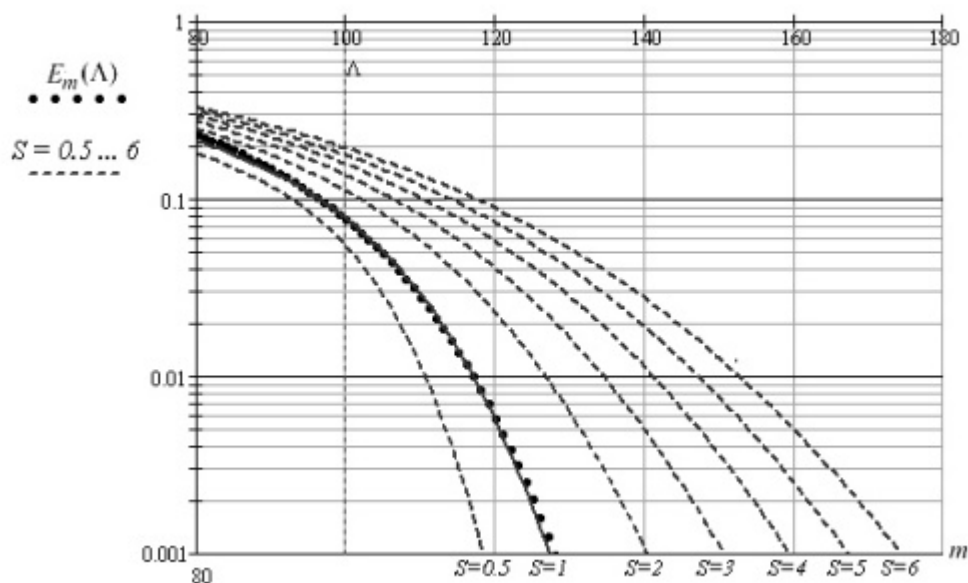


Рис. 2. Залежність ймовірності P_B від m та коефіцієнта S

З рисунку видно, що графіки ймовірностей, розрахованих за B -формулою Ерланга та формулою (10) при $S = 1$, співпадають (розбіжність до 5 %). При $S < 1$ (“вирівняний” потік) імовірність втрат вимог зменшується. При збільшенні коефіцієнта S імовірність втрат вимог за однакової ємності системи суттєво зростає, на що вказують графіки для $S = 2, \dots, 6$ (штрихові лінії).

За розподілом Ерланга визначаються стани системи типу $M/G/m$ з експонентним розподілом інтервалу часу між вимогами потоку, для якого $S = 1$. Гіперекспонентний розподіл за порядку $n = 1$ обертається в експонентний і тому він є його узагальненням. Але на відміну від розподілу Ерланга, який дійсний за будь-якого (G) закону розподілу тривалості обслуговування вимог, нормальний усічений розподіл станів системи при $S > 1$ справедливий тільки для моделі $HM/D/m$, тобто за постійної тривалості обслуговування. Для інших законів розподілу тривалості обслуговування вимог запропоновано уведення до формули (10) відповідного множника, в якому через коефіцієнт k враховується вид закону розподілу цієї тривалості.

Встановлено, що за $S > 1$ з позицій якості обслуговування регулярний закон розподілу тривалості обслуговування є найгіршим і тому (10) є верхньою межею значень імовірності втрат вимог при обслуговуванні мультисервісного трафіка. При цьому якість обслуговування вимог зростає або ймовірність втрат вимог зменшується у тому випадку, коли в законі розподілу тривалості сервісу присутня більша частка (ймовірність) коротших за тривалістю вимог. Короткі вимоги швидше йдуть із системи і, таким чином, її пропускна здатність зростає.

Для врахування крім σ^2 ще й виду закону розподілу тривалості сервісу для розрахунку ймовірності втрат вимог отримано наступну формулу:

$$P_B = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(m-\Lambda)^2}{2\sigma^2}}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\sigma} e^{-\frac{t^2}{2}} dt + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{\Lambda}{\sigma}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt} \frac{\sigma^2}{\Lambda} \left[1 - \frac{(S^2 - 1)(\sigma - \Lambda + m)}{\sigma(kS^2 - k + 5)} \right], \quad (11)$$

де k – коефіцієнт, що дорівнює 16,45; 4,25; 3,55; 2,85 та 2,32 для регулярного, рівномірного, експонентного, логарифмічно нормального та гіперекспонентного законів розподілу відповідно. Формула (11) дає розбіжність з даними імітаційного моделювання не більше $\pm 5\%$.

У телекомунікаційних системах та мережах потоки вимог можуть оброблятися не тільки за дисципліною обслуговування з явними втратами, але й способом з очікуванням, як у мережах ATM або IP . За неоднорідного трафіка (гіперекспонентний потік вимог) СРІ, що застосовуються в цих мережах, можуть бути представлені моделлю $HM/D/m/\infty$ – повнодоступна система на m серверів з необмеженою кількістю місць очікування в черзі (упорядкована черга $FIFO$). Необхідно визначити основні характеристики QoS :

- імовірність очікування $P_{w>0}$;
- середню тривалість очікування вимог в черзі t_q ;
- середню тривалість очікування вимог в системі W ;

– середню довжину черги Q .

Перелічені характеристики QoS необхідно розраховувати саме в такій послідовності, оскільки останні дві однозначно визначаються двома першими:

$$W = t_q P_{w>0}, \quad (12)$$

$$Q = \Lambda W. \quad (13)$$

Вираз (12) випливає з того, що середня тривалість очікування для будь-якої вимоги W (що очікує і не очікує) є середнім значення часу очікування, віднесеним до усіх вимог. Якщо ж відома середня тривалість очікування тільки затриманих вимог t_q , то, природно, для визначення W треба помножити цю тривалість на імовірність $P_{w>0}$, яка показує середню частку затриманих вимог.

Вираз (13) відповідає формулі Дж. Літтла – за W одиниць часу очікування в чергу надійде ΛW вимог.

Значно складніше розрахувати $P_{w>0}$ і t_q . Ці характеристики можуть бути визначені з функцій розподілу станів системи P_j і розподілу часу очікування початку обслуговування $P(t_q)$. Однак не існує загального методу отримання таких функцій, і вирази для них не є звичайно простими і явними формулами.

Для отримання аналітичного виразу для розрахунку t_q використовуємо наступні відомі результати:

- з S -формули Ерланга випливає, що в системі $M/M/m/\infty$ середня тривалість очікування для затриманих вимог $t_{q(M)} = 1 / (m - \Lambda)$;
- з формули Поллачека-Хінчина випливає, що в системі $M/D/1/\infty$ середня тривалість очікування для затриманих вимог $t_{q(D)} = t_{q(M)} / 2$.

Очевидно, що в шуканому виразі для розрахунку t_q системи $HM/D/m/\infty$ повинні враховуватися дані результати. Перший – тому, що пуассонівський потік (M) є окремим випадком гіперекспонентного (HM). Другий – тому, що односерверна система ($m = 1$) є окремим випадком багатосерверної.

Для системи $HM/D/m/\infty$ показано, що t_q більше $t_{q(M)}$ у $S / 2$ разів за ємності системи близької до $m = \Lambda$. Даний факт добре узгоджується з наведеними відомими співвідношеннями – врахована і відмінність гіперекспонентного потоку від пуассонівського через пікфактор S , і відмінність у два рази середньої тривалості очікування за постійної та експонентної тривалості обслуговування, але віднесено це до характерної точки $m = \Lambda$ ($m > \Lambda$ – умова ергодичності процесу).

Однак з ростом ємності системи m коефіцієнт $k = 2$ убуває приблизно зі швидкістю $k(m) \approx (m + \Lambda) / m$. Встановлено, що точність розрахунку t_q підвищується при заміні даної залежності на $k(m) \approx (m + \Lambda + 1 + \Lambda / m) / m$. Остаточний вираз для розрахунку t_q системи $HM/D/m/\infty$ має вид:

$$t_q = \left(\frac{S}{m - \Lambda} \right) \frac{m}{m + \Lambda + 1 + \Lambda / m} = \frac{S}{(m + 1) \left[1 - (\Lambda / m)^2 \right]}. \quad (14)$$

Для розрахунку $P_{w>0}$ застосуємо такі доводи. Імовірність очікування $P_{w>0}$ дорівнює імовірності того, що вимога, яка тільки-но надійшла, застає всі m серверів системи зайнятими:

$$P_{w>0} = \sum_{j=m}^{\infty} P_j = 1 - \sum_{j=0}^{m-1} P_j. \quad (15)$$

де j – стан системи ($0 \leq j \leq m$ – сервери, $m < j \leq \infty$ – черга).

Показано, що в моделі $HM/D/\infty$ за необмеженої кількості серверів вимоги обслуговуються без втрат. При цьому за постійної тривалості обслуговування t властивості потоку звільнень серверів збігаються з властивостями потоку надходження вимог і тому стани системи визначаються властивостями вхідного потоку вимог, а функції розподілу кількості вимог у системі P_j і кількості вимог, що надходять, P_i за час t збігаються, що показано у формулі (8).

При кінцевій кількості m і необмеженій кількості місць очікування вимоги також обслуговуються без явних втрат. Однак у цьому випадку вимоги, що надходять після зайняття всіх серверів системи, попадають у чергу на очікування, і у випадку звільнення хоча б одного з m зайнятих серверів відразу ж подаються з черги на обслуговування. Тепер на сервери системи надходять вимоги з первинного потоку з інтенсивністю Λ і з черги з інтенсивністю $\Lambda P_{w>0} t_q$, оскільки вимоги, що очікують у черзі, утворюють додатковий потік з інтенсивністю $\Lambda P_{w>0}$ і кожна з цих вимог очікує в черзі в середньому час t_q . Через те загальна інтенсивність навантаження на сервери збільшується до величини $\Lambda_2 = \Lambda + Q$, тому що згідно з (12) $P_{w>0} t_q$ є середня тривалість очікування W , а згідно з (13) – $\Lambda \cdot W$ є середня довжина черги Q .

У цих умовах функція розподілу кількості вимог у системі (вимоги на обслуговуванні та у черзі) або станів системи P_j відрізняється від функції розподілу кількості вимог, що надійшли, P_i . На рис. 3 представлені результати імітаційного моделювання у виді розподілів станів системи за гіперекспонентного потоку вимог, що надходить у систему з параметрами $\Lambda = 100$ Ерл та $S = 4$ для ємності системи $m = 105, 110$ і 120 серверів. (Для виключення нескінченної черги обов'язково має бути $m > \Lambda$)

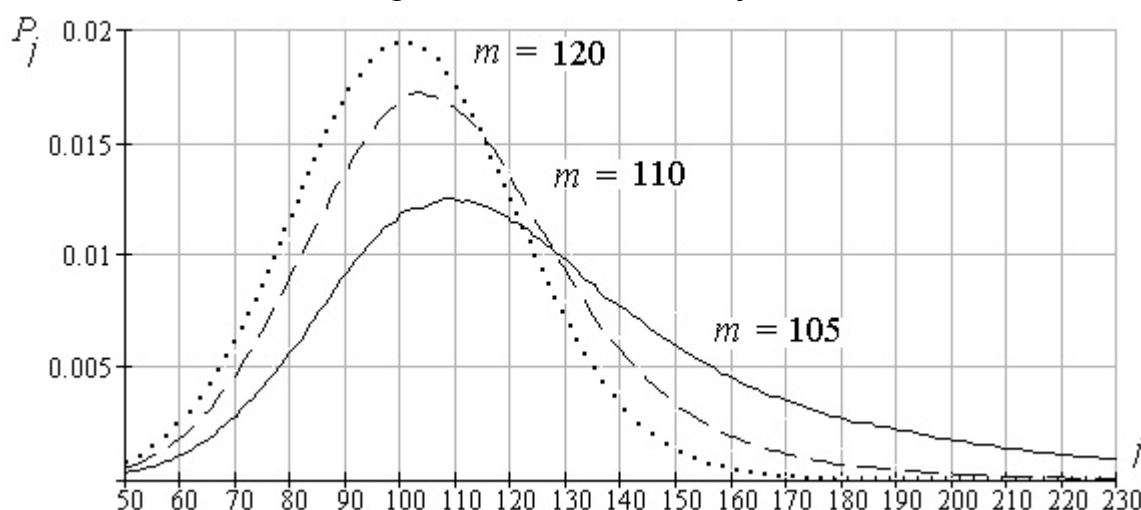


Рис. 3. Розподіл станів системи $HM/D/m/\infty$

З рисунка видно, що вже при $m = 120$ (пунктирна лінія) функція розподілу станів системи майже симетрична, а це дозволяє апроксимувати її нормальним законом розподілу.

Наведені графіки демонструють, що при зменшенні ємності системи m розкид окремих значень функції розподілу станів системи від середнього або математичного сподівання збільшується. З чого випливає, що додатковий потік вимог з черги не тільки збільшує загальну інтенсивність навантаження Λ_2 , але і її дисперсію σ^2 . На рис. 4 для даного приклада виконана апроксимація станів системи нормальним законом розподілу з параметрами $\Lambda_2 = \Lambda + Q$ і $\sigma_2 \approx \sigma + Q/2$ на ділянці, обумовленій межами підсумовування у формулі (15), тобто від 0 до $(m - 1)$.

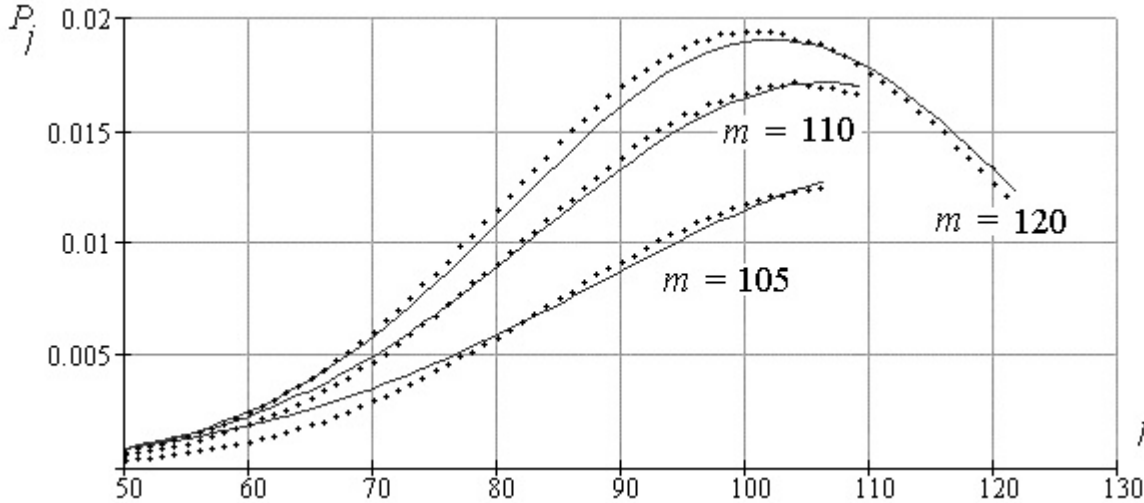


Рис. 4. Апроксимація функцій розподілу станів системи

Графіки, представлені на рис. 4. підтверджують високу точність апроксимації функції розподілу станів системи P_j (пунктирна лінія) нормальним законом розподілу (безперервна лінія) з параметрами:

$$\Lambda_2 = \Lambda + Q, \quad (16)$$

$$\sigma_2 \approx \sigma + Q/2. \quad (17)$$

З наведеного випливає простий ітераційний алгоритм розрахунку характеристик якості обслуговування системи $HM/D/m/\infty$:

- відповідно до (14) по заданих параметрах потоку вимог Λ і S за ємності системи m визначається t_q ;
- відповідно до (15) і (8) по параметрах Λ і σ^2 визначається передбачувана імовірність очікування $P_{w>0}$;
- за знайденим значенням t_q і $P_{w>0}$ відповідно до (12) і (13) визначаються передбачувані значення W і Q ;
- по знайденим відповідно до (16) і (17) значенням Λ_2 і σ_2 відповідно до (15) і (8) визначається уточнена імовірність $P_{w>0}$, тобто з урахуванням впливу додаткового навантаження на сервери системи з черги;
- за уточненим значенням імовірності $P_{w>0}$ відповідно до (12) і (13) уточнюються значення W і Q .

Встановлено, що реалізація запропонованого алгоритму у великому діапазоні варіювання параметрів Λ , S і m дає завжди декілька занижену оцінку імовірності очікування $P_{w>0}$, однак при цьому відносна похибка ніколи не перевищує 10%. Очевидно, що на величину помилки впливає наближена оцінка

(17) середньоквадратичного відхилення σ_2 . Крім того, відповідно до описаного алгоритму на останньому кроці знову уточнюються значення W і Q , і тому доцільно ще раз перерахувати $P_{w>0}$ з більш точними значеннями Λ_3 і σ_3 . Як показало моделювання, навіть при такому спрощеному підході до визначення σ , як рекомендовано в (17), результати розрахунків після третьої ітерації завжди дають верхню оцінку імовірності очікування $P_{w>0}$, що також ніколи не перевищує 10%.

У підтвердження цього для наведеного на рис. 3 і 4 прикладу моделі відповідно до запропонованого алгоритму виконані розрахунки та імітаційне моделювання, результати якого зведені в табл. 1. Тут W і t_q подані в одиницях середньої тривалості обслуговування.

Таблиця 1

Результати імітаційного моделювання

Параметр QoS	Модель	1-я ітерація		2-я ітерація		3-я ітерація	
		розрахунок	похибка	розрахунок	похибка	розрахунок	похибка
$m = 105$							
$P_{w>0}$	0,71332	0,41050	-42,6%	0,66514	-6,8%	0,74821	4,9%
Q	28,89636	16,67339	-42,3%	27,01616	-6,5%	30,39005	5,2%
W	0,28908	0,16681	-42,3%	0,27029	-6,5%	0,30404	5,2%
t_q	0,40526	0,40636	0,3%	0,40636	0,3%	0,40636	0,3%
$m = 120$							
$P_{w>0}$	0,21076	0,16674	-20,5%	0,19941	-5,4%	0,21080	0,0%
Q	2,26827	1,82124	-18,9%	2,18245	-3,8%	2,30356	1,6%
W	0,02264	0,01819	-18,9%	0,02178	-3,8%	0,02300	1,6%
t_q	0,10742	0,10910	1,6%	0,10910	1,6%	0,10910	1,6%

Як видно з табл. 1 відносна похибка розрахунку Q і W визначається сумарною точністю розрахунку t_q і $P_{w>0}$, і разом з тим похибка розрахунку всіх характеристик QoS залишається в межах $\pm 10\%$ (друга і третя ітерації). Розрахунки, що виконані для даного приклада методом Кроммеліна, дають заниження результату від 50 до 95% (з ростом m збільшується похибка).

Результати досліджень, що наведені в розділі 4, опубліковано в роботах автора [1, 2, 4-6, 8, 9, 25, 28, 31, 43, 44,].

У п'ятому розділі – „Оцінка характеристик якості обслуговування в умовах самоподібного та довільного трафіка” – проаналізовано методи розрахунку трафіка пакетних мереж зв'язку; розроблено ентропійний метод розрахунку характеристик якості обслуговування самоподібного трафіка в моделі $fBM/G/1/\infty$; запропоновано методи оцінки характеристик QoS моделей $G/M/1/\infty$ та $G/D/1/\infty$; для моделі $GI/G/1/\infty$ встановлено всі функціональні співвідношення між характеристиками QoS .

Оцінка характеристик якості обслуговування в СРІ за умов самоподібного трафіка (fBM) – дуже складна математична задача. Для односерверної системи з нескінченною чергою та постійним часом обслуговування (модель $fBM/D/1/\infty$) є

наближене рішення – формула Норрса, за якою визначається середня кількість вимог в системі N . Однак аналіз цієї формули показує, що при значеннях коефіцієнта Херста $H = 0,5$ отримуємо відомий результат для середньої кількості вимог в системі типу $M/M/1/\infty$, що суперечить початковим умовам виводу формули – тривалість обслуговування є константою, тобто має регулярний розподіл. Крім того, імітаційним моделюванням цей результат не підтверджується, оскільки за певних значень дає похибку до сотень відсотків.

Випадковий процес (ВП) надходження пакетів до СРІ на обслуговування, утворює потік пакетів (трафік), який характеризується певним законом розподілу, що встановлює зв'язок між значенням випадкової величини (кількістю пакетів) і ймовірністю появи цього значення. У більшості випадків для розрахунку параметрів QoS необхідно знати про закон розподілу тільки деякі його числові характеристики – моменти розподілу різних порядків. Однак вони можуть іноді бути й недостатніми для прогнозування значення випадкової величини. Може бути так, що ВП характеризуються однаковими значеннями Λ і D_Λ , але внутрішня структура цих процесів різна. Одні можуть мати плавно мінливі реалізації, а інші – яскраво виражену коливальну структуру при стрибкоподібній зміні окремих значень випадкової величини (наприклад, різке зростання кількості пакетів в мережі, що призводить до „пачковості” трафіка). Для „плавних” процесів характерна велика передбачуваність реалізацій, а для „пачкових” – дуже мала ймовірнісна залежність між двома випадковими величинами ВП. У таких випадках закон розподілу, що характеризує ВП, несе в собі деяку невизначеність і дозволяє з більшою або меншою надійністю прогнозувати значення випадкової величини. Тому використовувати ймовірнісні закони розподілу, що описують трафік у пакетних мережах, не дають такої кількісної оцінки невизначеності стану системи масового обслуговування, як ентропія розподілу $H_e = -\sum_{i=1}^m p_i \log p_i$. Ентропія не залежить від значень, яких набуває випадкова величина, а тільки від їхніх ймовірностей.

Для оцінки параметрів якості обслуговування самоподібного трафіка розроблено ентропійний метод, який зводиться до використання методів розрахунку відомих розподілів, ентропія яких співпадає або найбільш близька до ентропії станів системи при обслуговуванні самоподібного трафіка.

На рис. 5 представлено результати імітаційного моделювання системи $fBM/G/1/\infty$. У даному випадку самоподібний трафік сформований за розподілом Парето таким, щоб коефіцієнт самоподібності Херста становив $H = 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,85$ та $0,9$. При зміні величини завантаженості системи ρ від $0,3$ до $0,9$ (найбільш реальний режим функціонування) вимірюється ентропія розподілу станів системи, яку показано пунктирними лініями для вказаних значень H зверху вниз відповідно. Безперервними лініями показано розраховану ентропію H_e функції розподілу станів системи для відомих моделей $M/D/1/\infty$, $M/M/1/\infty$ та два графіка для моделі $M/LogN/1/\infty$ (зверху вниз відповідно). Для даних моделей коефіцієнт варіації тривалості обслуговування $C \equiv 0$, $C \equiv 1$, $C = 2$ та $C = 8$ відповідно.

З рис. 5 видно, що графіки ентропії моделі з самоподібним трафіком

перетинаються з графіками розрахованої ентропії функції розподілу станів системи для відомої моделі $M/G/1/\infty$. Змінюючи коефіцієнт варіації C в цій моделі можна практично „накрити” всю область можливих значень ентропії станів системи з самоподібним трафіком за будь-яких значень H та ρ .

Встановлено, що в тих точках, де однакова ентропія розподілу станів системи, є однаковими або близькими й досліджувані параметри QoS , такі як середня кількість вимог в системі N , середня довжина черги Q та середня тривалість очікування вимог в системі W . Наприклад, для моделей $M/D/1/\infty$ і $fBM/D/1/\infty$ при коефіцієнті Херста $H = 0,7$ та $\rho = 0,7$ ентропії функції розподілу станів системи дорівнюють $-1,66$ та $-1,70$ відповідно. При цьому для моделі $fBM/D/1/\infty$ середня кількість вимог в системі $N = 1,62$, а і для моделі $M/D/1/\infty$ $N = 1,52$. Такий же збіг основних характеристик QoS спостерігається в усіх інших точках, для яких близькі значення ентропії розподілу станів системи, незалежно від закону розподілу тривалості обслуговування. Тому для цих розрахунків можна застосовувати формулу Поллачека-Хінчина моделі $M/G/1/\infty$.

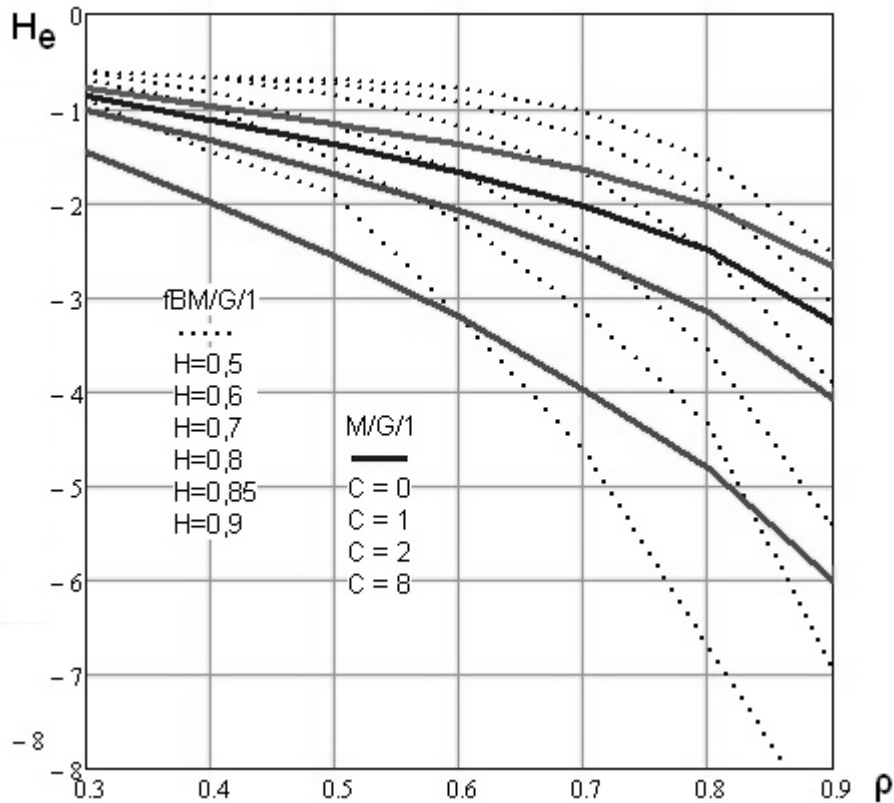


Рис. 5. Залежність ентропії розподілу станів системи H_e від ρ

Алгоритм ентропійного методу розрахунку характеристик QoS такий:

- для встановленого закону розподілу станів системи $fBM/G/1/\infty$ за відомими формулами визначається ентропія розподілу H_{fBM} ;
- зміною коефіцієнта варіації C для моделі $M/G/1/\infty$, наприклад $M/HM/1/\infty$, досягається збіг значень ентропії станів систем $H_{M/HM/1} = H_{fBM/G/1}$;
- за допомогою визначеного коефіцієнта варіації C визначається середня кількість пакетів у системі N за формулою Поллачека-Хінчина;
- через відомі співвідношення визначаються інші характеристики QoS .

Таким чином, розрахунок параметрів QoS в моделі з самоподібним трафіком за будь-якого закону розподілу тривалості обслуговування здійснимий. Необхідною умовою такого розрахунку є визначення ентропії розподілу станів системи. Метод дає на порядок більш точні результати, ніж іноді застосовувана формула Норроса для моделі $fBM/D/1/\infty$. Однак цим методом неможливо розрахувати імовірність очікування $P_{w>0}$, оскільки вона не дорівнює ρ , як це має місце за пуассонівського потоку.

У пакетних мережах зв'язку вхідні інформаційні потоки можуть мати постійну, змінну і змішану бітову швидкість, і тому математична модель потоку може бути від найпростішої пуассонівської до складної моделі фрактальних процесів (самоподібний трафік). Отже закон розподілу інтервалу часу між вимогами в цих потоках може бути довільний і тому резонно досліджувати узагальнений (G) вид розподілу випадкової величини цього інтервалу.

Для будь-якої односерверної системи $\rho = 1 - p_0$, де p_0 – імовірність вільності системи (стан системи p_0 – зайнято 0 серверів). Отже, ρ – чисельно збігається з імовірністю зайнятості системи P_{zn} (стан системи p_1 – зайнятий єдиний сервер, відповідає частці часу зайнятості серверу). З урахуванням ще й тих вимог, що знаходяться в черзі, у стаціонарному режимі існує стаціонарний розподіл кількості вимог у системі (сервер та черга) p_k , де k – кількість вимог. Цей розподіл не залежить від моменту прибуття вимоги до системи.

За пуассонівського потоку імовірність очікування $P_{w>0}$ збігається з імовірністю зайнятості системи P_{zn} . Для односерверної моделі $M/G/1/\infty$ з довільним розподілом тривалості обслуговування дані імовірності однакові і $P_{w>0} = \rho$. Однак для моделі $G/M/1/\infty$ такої рівності нема, тобто за цим параметром моделі не інваріантні. Показано, що система $G/M/1/\infty$ призводить до геометричного розподілу кількості вимог у системі в моменти надходження нових вимог r_k , де k – кількість вимог. Розподіл p_k відрізняється від розподілу r_k тим, що $p_0 = 1 - P_{zn}$ (або $p_0 = 1 - \rho$), у той час як $r_0 = 1 - P_{w>0}$. Для системи $M/G/1/\infty$ виконується рівняння $p_k = r_k$.

Вимога повинна очікувати обслуговування з імовірністю $P_{w>0} = 1 - r_0$. Тому за експонентного розподілу тривалості обслуговування безумовний розподіл тривалості очікування визначиться так:

$$W(t) = 1 - P_{w>0} e^{-\mu(1-P_{w>0})t}.$$

З цього можна розрахувати середній час очікування у системі $W = \frac{D_{w>0}}{1 - D_{w>0}}$, а далі й всі інші параметри якості обслуговування. Для моделі

$G/M/1/\infty$ встановлено важливі властивості односерверної системи, які виконуються тільки за експонентної тривалості обслуговування. По-перше, середній час очікування в черзі t_q чисельно збігається із середнім часом перебування вимоги в системі T . Це означає, що середній час очікування в системі W менше середнього часу очікування в черзі t_q на величину середньої тривалості обслуговування, тобто $W = t_q - 1$. По-друге, імовірність очікування можна визначити як $P_{w>0} = Q / N$.

Для наближеного розрахунку характеристик QoS моделі $G/D/1/\infty$ використано виявлену властивість моделі $G/M/1/\infty$, а саме: $t_q = T$. Оскільки з визначення середнього часу перебування вимоги в будь-якій системі (в тому числі й в моделі $G/G/1/\infty$) впливає, що $T = W + 1$, то для моделі $G/M/1/\infty$ буде $t_q - W = 1$. З табл. 2. видно, що при виконанні цього, кожна з формул розрахунку характеристик QoS моделі $G/G/1/\infty$ збігається з аналогічною формулою моделі $G/M/1/\infty$. Для моделі $M/D/1/\infty$ величина $t_q - W = 0,5$. Тому при виконанні цього разом з умовою $P_{w>0} = \rho$, властивої за пуассонівського потоку, кожна з формул моделі $G/G/1/\infty$ перетвориться у відповідну формулу моделі $M/D/1/\infty$ (табл. 2). При $P_{w>0} \neq \rho$ з тих же формул моделі $G/G/1/\infty$ отримано відповідні формули розрахунку характеристик QoS моделі $G/D/1/\infty$. Але для цієї моделі різниця t_q та W не завжди дає 0,5 – буває більше або менше цього значення, що декілька знижує точність розрахунку у цих випадках.

Таким чином для моделі з чергою $G/G/1/\infty$ встановлені функціональні співвідношення між всіма характеристиками QoS , які дають можливість розраховувати будь-яку з характеристик QoS за наближеної оцінки хоча б однієї з них. Дана модель є узагальненням всіх інших односерверних моделей.

Таблиця 2

Функціональні співвідношення між характеристиками QoS

Параметр QoS	Модель СРІ			
	$M/D/1/\infty$	$G/M/1/\infty$	$G/G/1/\infty$	$G^*/D/1/\infty$
P_{zn}	ρ	ρ	$\rho, \frac{Q}{t_q P_{w>0}}$	
$P_{w>0}$	ρ	$1 - \frac{\rho}{N}$	$\frac{W}{t_q}, \frac{Q}{t_q \rho}$	
Q	$\frac{\rho^2}{2(1-\rho)}$	$\frac{\rho P_{w>0}}{1 - P_{w>0}}$	$\frac{\rho P_{w>0}}{1 - P_{w>0}} (t_q - W)$	$\frac{\rho P_{w>0}}{2(1 - P_{w>0})}$
W	$\frac{\rho}{2(1-\rho)}$	$\frac{P_{w>0}}{1 - P_{w>0}}$	$\frac{P_{w>0}}{1 - P_{w>0}} (t_q - W)$	$\frac{P_{w>0}}{2(1 - P_{w>0})}$
t_q	$\frac{1}{2(1-\rho)}$	$\frac{1}{1 - P_{w>0}}$	$\frac{1}{1 - P_{w>0}} (t_q - W)$	$\frac{1}{2(1 - P_{w>0})}$
N	$\rho + \frac{\rho^2}{2(1-\rho)}$	$\frac{\rho}{1 - P_{w>0}}$	$\rho + \frac{\rho P_{w>0}}{1 - P_{w>0}} (t_q - W)$	$\frac{\rho(2 - P_{w>0})}{2(1 - P_{w>0})}$
T	$1 + \frac{\rho}{2(1-\rho)}$	$\frac{1}{1 - P_{w>0}}$	$1 + \frac{P_{w>0}}{1 - P_{w>0}} (t_q - W)$	$\frac{2 - P_{w>0}}{2(1 - P_{w>0})}$

Результати досліджень, що наведені в розділі 5, опубліковано в роботах автора [13-15, 17, 19, 21, 23].

У шостому розділі – „Аналіз і синтез мереж рухомого зв'язку та сигналізації” – розроблено метод розрахунку якості обслуговування абонентів мережі рухомого зв'язку та метод оцінки ефективності використання каналів сигналізації СКС №7 на транспортному рівні еталонної моделі OSI.

Синтез мереж мобільного зв'язку, який вимагає в остаточному підсумку визначення структури, складу й обсягу устаткування, складається з декількох етапів. На етапі частотного планування визначаються розміри кластерів, потужності передавачів, висота антен, кількість секторів кожної базової станції. Найбільш складна задача – це визначення місць установки базових станцій, кількості і радіусів стільників, а також кількості задіяних радіоканалів для кожного стільника. Вихідні дані на цьому етапі – це прогнозована кількість мобільних абонентів (МА), очікувана питома інтенсивність навантаження МА, норма QoS або припустима імовірність відмовлення в обслуговуванні.

Для оцінки імовірності відмовлення в обслуговуванні P_k через зайнятість радіоканалів можна було б використати B -формулу Ерланга, якщо потік вимог пуассонівський. Але ця імовірність характеризує якість обслуговування МА за умови, що МА під час розмови (сеансу зв'язку) не пересувається. Якщо ж під час зв'язку МА перетинає декілька стільників, то в кожному з них може не виявитися вільних радіоканалів для естафетної передачі поточного з'єднання, а це приведе до його переривання. Тому для визначення імовірності закінчення розмови за час проходження кожного стільника P_c враховується середня тривалість сеансу зв'язку, радіус стільника, швидкість руху МА та дисперсія часу перебування МА в одному стільнику. Необхідність урахування дисперсії часу перебування МА в одному стільнику очевидна, оскільки реально швидкість руху МА не постійна, та й маршрут проходження за межі стільника може бути не завжди оптимальним і залежить від конфігурації місцевості.

З імовірностей P_k і P_c можна знайти повну імовірність відмовлення в обслуговуванні P . Однак, якщо точність імовірності P_c підвищується тим, що окрім середнього значення часу перебування МА в стільнику враховується ще і його дисперсія, то й при розрахунку P_k необхідно враховувати не тільки середнє значення інтенсивності навантаження Λ , але і його дисперсію D_Λ . Таким чином, імовірність відмовлення в обслуговуванні через зайнятість радіоканалів P_k пропонується розраховувати так:

$$P_k = \frac{S}{\sum_{i=0}^m \exp\left[\frac{-(i-2\Lambda+m)(i-m)}{2\Lambda S}\right]} \left[1 - \frac{m - (\Lambda - \sqrt{D_\Lambda})}{\left(\frac{5}{S^2 - 1} + k\right) \sqrt{D_\Lambda}} \right],$$

де k – коефіцієнт, що враховує закон розподілу тривалості сеансу зв'язку.

Повна імовірність відмовлення в обслуговуванні з урахуванням переривання зв'язку при пересуванні МА може бути розрахована з формули:

$$P = P_k \left[1 + \frac{(1 - P_k)(1 - P_{c1})}{1 - (1 - P_k)(1 - P_c)} \right],$$

де P_{c1} – імовірність закінчення сеансу зв'язку в першому стільнику.

Впровадження на існуючих мережах зв'язку з комутацією каналів технологій пакетної комутації забезпечує реальні можливості застосування тут пакетних мереж сигналізації. Мережі сигналізації досліджуються, як правило, з позицій мережного і транспортного рівнів моделі OSI. Аналітично встановлено залежність між ефективністю використання каналів сигналізації на мережному і транспортному рівнях з урахуванням довжини перевірного кодового слова:

$$\eta_i = \eta_i' \rho_i \beta_i^P = \rho_i \frac{\beta_i^P}{1 + \frac{h_i}{L^P}},$$

де $\rho = \lambda / \mu = \lambda t$ – коефіцієнт завантаження сигналізаційного каналу на мережному рівні; λ – інтенсивність сигналізаційних пакетів, μ – інтенсивність обслуговування, t – середня тривалість обслуговування сигналізаційних пакетів; β_i – коефіцієнт використання пропускної здатності на каналному рівні (застосовується самоперевіряючий циклічний код); h_i – приведена оцінка довжини перевірного кодового слова; L^P – довжина інформаційної частини в *MSU* (значуща сигнальна одиниця, використовується для передачі сигнальної інформації, яка формується підсистемами користувачів).

Показано, що зі зменшенням втрат на мережному рівні η_i та при малому значенні приведеної довжини перевірочних кодових слів h_i при збільшенні довжини сигналізаційних пакетів мовного виду L^P , коефіцієнт використання на транспортному рівні η_i' збільшується.

Результати досліджень, що наведені в розділі 6, видано в роботах [7, 22].

У сьомому розділі – „Дослідження систем розподілу інформації методами імітаційного моделювання” – розглянуто методи статистичних випробувань та основні принципи побудови моделюючих алгоритмів. Розроблено оригінальну комп'ютерну програму моделювання систем масового обслуговування, на яку отримано свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір України № 32499.

Математичні моделі функціонування СРІ, що розглянуто в розд. 1, орієнтовані на можливість отримання в тій або іншій формі аналітичних рішень для обумовлених характеристик СРІ. Можливість отримання таких рішень істотно обмежується видом вхідних потоків, законом розподілу тривалості обслуговування та структурою СРІ. Використання методів моделювання дозволяє помітно послабити ті обмеження, які відносяться до виду вхідних потоків вимог. Таким чином, основним інструментарієм дослідження задач, що не піддаються аналітичним і чисельним методам, є імітаційне моделювання.

При імітаційному моделюванні алгоритм програми відтворює процес функціонування системи в часі, імітуючи складові процесу і елементарні явища зі збереженням їх часової та логічної структури.

За допомогою розробленої імітаційної моделі перевірено вірогідність всіх запропонованих в дисертації методів аналізу і синтезу СРІ, оцінено їх точність.

Результати досліджень, що наведені в розділі 7, видано в роботах автора [1, 3, 11, 26, 35].

ВИСНОВКИ

Даними дослідженнями вирішено важливу наукову проблему розробки нових методів аналізу і синтезу систем розподілу інформації, які функціонують в умовах мультисервісного трафіка. Новими науковими результатами роботи є вперше розроблені методи розрахунку характеристик якості обслуговування (*QoS*) мультисервісного трафіка для широко застосовуваних в телекомунікаціях моделей систем розподілу інформації. Запропоновані методи створюють основу для достовірного аналізу і синтезу складних СРІ та підвищення якості надання телекомунікаційних послуг. Результати дисертації застосовні при розробці, плануванні, проектуванні та експлуатації мультисервісних мереж зв'язку.

Найбільш суттєвими науковими та практичними результатами роботи є:

1. На основі вимірювань і аналізу статистичних характеристик потоків трафіка сучасних мереж зв'язку, побудованих за технологіями комутації каналів та пакетів, дослідження видів розподілу ймовірно-часових параметрів мультисервісного трафіка, дослідження впливу законів розподілу тривалості обслуговування на характеристики *QoS* в умовах мультисервісного трафіка, дослідження впливу явища самоподібності трафіка на пропускну здатність мультисервісної мережі зв'язку визначено три типи реального трафіка мультисервісних мереж, для опису якого слід застосовувати певні математичні моделі: однорідний, різнорідний та пачковий трафік. Ступінь відмінності цих типів трафіка визначається коефіцієнтом скупченості навантаження, який відповідно є в межах 1-2, 2-15 та 15-60.

2. В сегментах мультисервісної мережі з однорідним трафіком, що описується моделлю експонентного потоку або пуассонівського закону розподілу інтенсивності навантаження, розроблено:

- для повнодоступної СРІ (модель $M/D/m/\infty$ з чергою) новий метод розрахунку якості обслуговування, в якому основні характеристики *QoS* моделі $M/D/m/\infty$ розраховуються по характеристикам моделі $M/M/m/\infty$ з використанням *C*-формули Ерланга та вперше отриманої апроксимуючої функції, яка залежить від ємності системи та інтенсивності навантаження;
- для симетричної пакетної мережі доступу (модель $M_B/M/m$ з втратами) новий рекурентний метод розрахунку пропускну здатності мережі, в якому для підвищення точності автономні кластери мережі розраховуються в цілому, без поділу їх на окремі вузли доступу.

Розроблені методи дозволяють суттєво спростити аналіз і синтез СРІ при достатній точності для першого з них та абсолютній точності для другого. В прототипі першого метода для розрахунків характеристик *QoS* замість точних аналітичних формул використовувались відповідні діаграми, а в прототипах другого – тільки наближені оцінки.

3. В сегментах мережі з більш нерівномірним і різнорідним трафіком, який описується моделлю гіперекспонентного потоку або нормального закону розподілу інтенсивності навантаження:

- для повнодоступної СРІ (модель $HM/D/m$ з втратами) вперше визначено функцію розподілу стаціонарних імовірностей станів системи, яка враховує дисперсію інтенсивності навантаження;

- на основі запропонованої функції розподілу станів системи для повнодоступної СРІ (модель $HM/G/m$ з втратами) вперше розроблено новий метод розрахунку ймовірності втрати вимоги, який враховує скупченість інтенсивності навантаження або пікфактор трафіка та вид закону розподілу тривалості обслуговування;
- для повнодоступної СРІ (модель $HM/D/m/\infty$ з чергою) вперше розроблено новий ітераційний метод розрахунку характеристик QoS , який враховує збільшення інтенсивності навантаження та її стандартного відхилення, що утворюються за рахунок додаткового потоку вимог, який надходить до системи із черги.

Гіперекспонентна модель потоку, як узагальнення ідеалізованої пуассонівської моделі, за своїми властивостям є адекватною до моделі трафіка мультисервісних мереж з різнорідними потоками вимог, а це дозволяє розраховувати характеристики функціонування таких систем більш точно.

4. В мультисервісних пакетних мережах з пачковим трафіком, який може бути описаний моделями самоподібного потоку або узагальненого (довільного) закону розподілу інтенсивності навантаження:

- для СРІ з самоподібним трафіком (модель $fBM/G/1/\infty$ з чергою) запропоновано новий ентропійний метод оцінки характеристик QoS , який дає на порядок точніші результати, ніж наближена формула Норрса;
- для СРІ з довільним трафіком (модель $G/M/1/\infty$ з чергою) запропоновано метод оцінки характеристик QoS , який ґрунтується на геометричному розподілі кількості вимог у системі в моменти надходження нових вимог;
- для СРІ з довільним трафіком (модель $G/D/1/\infty$ з чергою) запропоновано наближений метод оцінки характеристик QoS , точність якого визначається точністю оцінки різниці в часі очікування вимог в черзі та в системі в цілому;
- для СРІ з довільним трафіком (модель $G/G/1/\infty$ з чергою) встановлені всі функціональні співвідношення між характеристиками QoS , що дає змогу розраховувати будь-яку з характеристик QoS за наближеної оцінки хоча б однієї з них.

5. Для мереж сигналізації СКС № 7 запропоновано новий метод оцінки продуктивності каналів сигналізації на мережному та транспортному рівнях еталонної моделі взаємодії відкритих систем, який може застосовуватись для мереж фіксованого зв'язку та з'єднань з мобільними і пакетними мережами передавання даних.

6. Для мереж мобільного зв'язку вперше розроблено метод розрахунку ймовірності відмови в наданні радіоканалу, який враховує не тільки дисперсію тривалості перебування мобільного абонента в межах дії однієї базової станції, а й дисперсію інтенсивності навантаження та вид закону розподілу тривалості сеансу зв'язку мобільного абонента.

7. Розроблено систему автоматизованого проектування та моделювання телекомунікаційних мереж (свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір України № 32499 та № 32500), які призначені для виконання робочих проектів телекомунікаційних систем та мереж і дослідження їх характеристик.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА

1. Ложковський А.Г. Теорія масового обслуговування в телекомунікаціях / А.Г. Ложковський. – Одеса, 2010. – 112 с.
2. Відомчі будівельні норми України. Проектування телекомунікацій. ВБН В.2.2-33-2007. Споруди станційні місцевих телефонних мереж / А.П. Баєв, С.В. Зяблов, А.Г. Ложковський, М.О. Чумак та ін. – К.: 2007. – 98 с.
3. Ложковский А.Г. Статистическое моделирование полнодоступного пучка с потерями / А.Г. Ложковский // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2003. – № 1. – С. 75-82.
4. Ложковський А.Г. Вплив закону розподілу тривалості зайняття на якість обслуговування реального потоку викликів / А.Г. Ложковський // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2003. – № 4.– С. 26-28.
5. Ложковський А.Г. Нова методика оцінювання ймовірності втрат викликів, наближена до реальних умов / А.Г. Ложковський // К.: Зв'язок. – 2004. – № 3. – С. 52-53.
6. Ложковский А.Г. Исследования системы обслуживания с ожиданием и рекуррентным потоком вызовов / А.Г. Ложковский // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2004. – № 2. – С. 56-59.
7. Ложковский А.Г. Метод расчета качества обслуживания абонентов подвижной связи / А.Г. Ложковский // Праці УНДІРТ. – 2004. – № 4(40). – С. 21-23.
8. Ложковский А.Г. Метод расчета стационарного распределения вероятностей состояний в модели Пальма / А.Г. Ложковский // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2005. – № 1. – С. 58-62.
9. Ложковский А.Г. Метод расчета систем обслуживания с ожиданием при произвольном потоке вызовов / А.Г. Ложковский // К.: Зв'язок. – 2006. – № 1. – С. 57-60.
10. Ложковский А.Г. Рекуррентный метод расчета пропускной способности пакетной сети доступа / А.Г. Ложковский, Н.С. Салманов, Н.А. Чумак // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2006. – № 2. – С. 44-48.
11. Ложковский А.Г. Моделирование многоканальной системы обслуживания с организацией очереди / А.Г. Ложковский, Н.С. Салманов, О.В. Вербанов // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2007. – № 3/6 (27). – С. 72-76.
12. Ложковский А.Г. Проблемы перехода к сетям нового поколения NGN / А.Г. Ложковский, О.В. Вербанов // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2007. – № 1.– С. 161-163.
13. Ложковский А.Г. Оценка параметров качества обслуживания самоподобного трафика энтропийным методом / А.Г. Ложковский, Р.А. Ганифаев // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2008. – № 1. – С. 57-62.
14. Ложковский А.Г. Влияние закона распределения длительности обслуживания в условиях самоподобного трафика на параметры QoS / А.Г. Ложковский, Р.А. Ганифаев // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2008. – № 4/3(34). – С. 46-50.

15. Ложковский А.Г. Сравнительный анализ методов расчета характеристик качества обслуживания при самоподобных потоках в сети / А.Г. Ложковский // Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ПІМЕ ім. Г. Є. Пухова НАН України. – Вип. 47. – К.: 2008. – С. 187-193.
16. Ложковский А.Г. Простий метод розрахунку багатоканальної системи з чергою в моделі $M/D/m/r=\infty$ (Задача Кроммеліна) / А.Г. Ложковский // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2008. – № 2. – С. 16-19.
17. Ложковский А.Г. Розрахунок якості обслуговування в пакетній мережі за необмеженої довжини нагромаджувального буфера / А.Г. Ложковский // К.: Зв'язок. – 2009. – № 3(87). – С. 17-19.
18. Ложковский А.Г. Методи аналізу і синтезу систем розподілу інформації в умовах реального трафіка / А.Г. Ложковский // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: „Радіоелектроніка та телекомунікації”. – Вип. 645. – 2009. – С.146-156.
19. Ложковский А.Г. Дослідження функціонування телекомунікаційних систем в умовах самоподібного трафіка / А.Г. Ложковский, К.Б. Нікіфоренко // Наукові записки УНДІЗ. Науково-виробничий збірник. – 2009. – № 2(10). – С. 60-64.
20. Ложковский А.Г. Модель мультисервисного трафіка и метод расчета параметров QoS при его обслуживании / А.Г. Ложковский // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2009. – Вып. 157. – С. 48-52.
21. Ложковский А.Г. Расчет характеристик QoS в одноканальной системе с непуассоновским трафиком / А.Г. Ложковский, // Моделювання та інформаційні технології. Зб. наук. пр. ПІМЕ НАН України. – Вип. 54. – К.: 2009. – С.154-160.
22. Алиев Г.А. Оценка эффективности использования каналов сигнализации на транспортном уровне / Г.А. Алиев, А.Г. Ложковский // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2009. – № 2. – С. 93-97.
23. Ложковский А.Г. Метод расчета одноканальных систем с бесконечной очередью и произвольным потоком заявок / А.Г. Ложковский // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2009. – Вып. 159. – С. 50-53
24. Ложковский А.Г. Математическая модель трафика в сетях с коммутацией пакетов / А.Г. Ложковский // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2010. – № 1. – С. 63-67.
25. Ложковский А.Г. Імовірність втрат в системі з гіперекспонентним потоком за постійної тривалості обслуговування вимог / А.Г. Ложковский // Наукові записки УНДІЗ. Науково-виробничий збірник. – 2010. – № 1(13). – С. 79-83.
26. Моделювання систем масового обслуговування. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір України № 32499 / А.Г. Ложковский // Дата реєстрації 23.03.2010.
27. Система автоматизованого проектування телекомунікаційних мереж. Свідоцтво про реєстрацію авторського права на твір України № 32500 / А.Г. Ложковский // Дата реєстрації 23.03.2010.

28. Ложковський А.Г. Влияние закона распределения длительности занятия на качество обслуживания / А.Г. Ложковський // Труды VII междунар. НПК „Системы и средства передачи и обработки информации”. – Одесса. – 2003. – С. 103-104.
29. Захарченко Н.В. Методи расчёта телекоммуникационного оборудования в условиях реального потока вызовов / Н.В. Захарченко, А.Г. Ложковський // Вісник Укр. Будинку економ. та наук. знань. – К.: 2004. – № 4. – С. 102-109.
30. Ложковський А.Г. Характеристики качества обслуживания реальных потоков вызовов в системе с ожиданием / А.Г. Ложковський // VIII междунар. НПК „Системы и средства передачи и обработки информации”. – Одесса. – 2004. – С. 78-79.
31. Ложковський А.Г. Анализ СМО с ожиданием и произвольным потоком заявок на обслуживание / А.Г. Ложковський // Труды II междунар. семинара „Информационные системы и технологии”, – Одесса. – 2004 – С. 23-26.
32. Ложковський А.Г. Автоматизация проектирования телекоммуникационных сетей / А.Г. Ложковський, Н.В. Коломиец, Т.Я. Бучак // II-й междунар. симпозиум «Телекоммуникации без границ». – Одесса. – 2005. – С. 11-12.
33. Ложковський А.Г. Оптимальное проектирование телекоммуникационных сетей / А.Г. Ложковський // Труды III междунар. семинара „Информационные системы и технологии”. – Одесса. – 2005. – С. 38-41.
34. Ложковський А.Г. Проблемы расчета телекоммуникационных служб мультисервисных сетей / А.Г. Ложковський, Е.В. Лысюк // IX междунар. конф. „Проблемы функционирования информационных сетей” / Ин-т вычислит. математики и математической геофизики СОРАН, г. Новосибирск. – 2006.
35. Ложковський А.Г. Имитационное моделирование, как инструментальный исследования моделей потоков в NGN / А.Г. Ложковський, О.В. Вербанов // матеріали III міжнародної НТК „Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування”. – Вінниця. – 2007. – С. 29-30.
36. Ложковський А.Г. Модель обслуговування навантаження мультисервісною мережею з контролем якості обслуговування / А.Г. Ложковський, О.В. Лисюк // матеріали III міжнар. НТК „Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування”. – Вінниця. – 2007. – С. 31-32.
37. Ложковський А.Г. Спосіб оцінки характеристик якості обслуговування різнорідної завантаженості в мультисервісних мережах / А.Г. Ложковський, О.В. Вербанов // матеріали 62 НТК. викладачів, науковців, молодих вчених аспірантів та магістрантів „Освіта і наука”. – Одеса. – 2007. – С. 10-11.
38. Ложковський А.Г. Методи расчета качества обслуживания в мультисервисных сетях связи / А.Г. Ложковський // The 2-nd International Conference „Telecommunication, Electronics and Informatics”. – Technical University of Moldova, Chishinau. – 2008. – P. 117-126.
39. Ложковський А.Г, Технологічні аспекти впровадження мультисервісних мереж / А.Г. Ложковський, О.В. Вербанов // матеріали IV Міжнародної НТК „Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування”, СПРТП-2009 – Вінниця, 2009. – С. 16.

40. Ложковський А.Г. Исследование параметров телефонной нагрузки на ведомственной сети / А.Г. Ложковський, В.В. Ганчев, В.Ю. Гордиенко // IV Міжнародна НТК „Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування”, СПРТП-2009 – Вінниця, 2009. – С. 17.
41. Ложковський А.Г. Анализ показателей качества обслуживания вызовов на телефонной сети / А.Г. Ложковський, К.А. Петрусенко // матеріали IV Міжнародної НТК „Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій та приладобудування”, СПРТП-2009 – Вінниця, 2009. – С. 18.
42. Loshkovskiy A.G. A simple way to calculate the single-server queue / A.G. Loshkovskiy // матеріали НПК „Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій”. – Львів, 2009. – С. 13-15.
43. Loshkovskiy A.G. Planning telecommunication system throughput / A.G. Loshkovskiy, Y.O. Babich // НПК „Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій”. – Львів, 2009. – С. 15-17.
44. Ложковський А.Г. Развитие теории телетрафика / А.Г. Ложковський // матеріали 64-ї наук.-техн. конф. проф.-викл. складу, науков. та аспірантів. – Одеса, 2009. – С. 108-116.

АНОТАЦІЇ

Ложковський А.Г. Аналіз і синтез систем розподілу інформації в умовах мультисервісного трафіка. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук зі спеціальності 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі. – Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова, Одеса, 2010.

Дисертація присвячена вирішенню науково-практичної проблеми розробки нових методів аналізу і синтезу структурно-складних систем розподілу інформації, що функціонують в умовах мультисервісного трафіка.

Класифіковано три типи трафіка мультисервісних мереж зв'язку, які властиві окремим сегментам або мережі в цілому. Ступінь відмінності трафіка визначається коефіцієнтом скупченості навантаження. Для кожного з його типів розроблено відповідні методи оцінки характеристик QoS при обробці трафіка в системах розподілу інформації, представлених моделями: $M/D/m/\infty$, $M_B/M/m$, $NM/G/m$, $NM/D/m/\infty$, $fBM/G/1/\infty$, $G/M/1/\infty$ та $G/D/1/\infty$. Для моделі $G/G/1/\infty$ встановлені аналітичні взаємозв'язки між всіма характеристиками QoS .

Для мережі мобільного зв'язку розроблено метод розрахунку ймовірності відмови в наданні радіоканалу, а для мережі сигналізації – метод оцінки продуктивності каналів сигналізації на мережному та транспортному рівнях.

Розроблено систему автоматизованого проектування та імітаційного моделювання телекомунікаційних систем і мереж.

Ключові слова: телекомунікаційна мультисервісна мережа, модель трафіка, пікфактор трафіка, аналіз і синтез систем розподілу інформації,.

Ложковский А.Г. Анализ и синтез систем распределения информации в условиях мультисервисного трафика. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.12.02 – телекоммуникационные системы и сети. – Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова, Одесса, 2010.

Диссертация посвящена решению научно-практической проблемы разработки новых методов анализа и синтеза систем распределения информации (СРИ), функционирующих в условиях мультисервисного трафика.

Классифицировано три типа трафика мультисервисных сетей, имеющих место в отдельных сегментах или сети в целом: однородный, разнородный и пачечный. Степень их отличия определяется пик-фактором трафика или коэффициентом скупенности нагрузки, находящимся в пределах 1-2, 2-15 и 15-60 соответственно. Для каждого из типов трафика разработаны адекватные методы расчета характеристик качества обслуживания (QoS).

Для СРИ с однородным трафиком (модель $M/D/m/\infty$) разработан новый метод расчета качества обслуживания, в котором основные характеристики QoS модели $M/D/m/\infty$ рассчитываются по характеристикам модели $M/M/m/\infty$. При этом используется C -формула Эрланга и новая аппроксимирующая функция, зависящая от емкости системы и интенсивности нагрузки.

Для симметричной пакетной сети доступа, представленной моделью $M_B/M/m$, разработан рекуррентный метод расчета пропускной способности сети, где с целью повышения точности предусматривается расчет автономных кластеров сети в целом, без разделения их на отдельные узлы доступа.

В сегментах сети с разнородным и более неравномерным трафиком, представленного моделью гиперэкспоненциального потока или нормального закона распределения интенсивности нагрузки:

– для модели $NM/D/m$ определена функция распределения стационарных вероятностей состояний системы, учитывающая дисперсию нагрузки;

– для модели $NM/G/m$ разработан метод расчета вероятности потери заявки, учитывающий пик-фактор трафика и вид закона распределения продолжительности обслуживания;

– для модели $NM/D/m/\infty$ разработан итерационный метод расчета характеристик QoS , учитывающий увеличение интенсивности нагрузки и ее стандартного отклонения, образующихся за счет дополнительного потока заявок, поступающих в систему из очереди

В мультисервисных пакетных сетях связи с пачечным трафиком, представляемого моделями самоподобного потока или обобщенного закона распределения интенсивности нагрузки:

– для модели $fBM/G/1/\infty$ разработан энтропийный метод оценки характеристик QoS самоподобного трафика, что дает на порядок точнее результаты, чем известная приближенная формула Норроса;

– для модели $G/M/1/\infty$ предложен метод оценки характеристик QoS , основанный на геометрическом распределении количества заявок в системе в моменты поступления новых заявок;

– для модели $G/D/1/\infty$ предложен приближенный метод оценки характеристик QoS , точность которого определяется точностью оценки различия во времени ожидания требований в очереди и в системе;

– для модели $G/G/1/\infty$ установлены функциональные соотношения между всеми характеристиками QoS , что позволяет рассчитывать любую из характеристик QoS при приближенной оценке хотя бы одной из них.

Для сети сигнализации ОКС № 7 предложен метод оценки производительности каналов сигнализации на сетевом и транспортном уровнях эталонной модели ВОС, применимый для сетей фиксированной связи и соединений с мобильными и пакетными сетями передачи данных.

Для сети мобильной связи разработан метод расчета вероятности отказа в предоставлении радиоканала, учитывающий не только дисперсию продолжительности пребывания мобильного абонента в зоне действия базовой станции, а дисперсию интенсивности нагрузки и вид закона распределения продолжительности сеанса связи мобильного абонента.

Разработаны система автоматизированного проектирования и моделирования телекоммуникационных сетей, предназначенные для выполнения рабочих проектов телекоммуникационных систем и сетей и исследования их характеристик

Ключевые слова: телекоммуникационная мультисервисная сеть, модель трафика, пик-фактор трафика, анализ и синтез систем распределения информации.

Lozhkovskyi A.G. The analysis and synthesis of information distribution systems in conditions of multiservice traffic. – The Manuscript.

Thesis for the academic degree of the Doctor of Engineering science in a speciality 05.12.02 – telecommunication systems and networks. – Odessa national academy of telecommunication is named after A. S. Popov, Odessa, 2010.

The dissertation devoted to the decision of a scientific-practical problem of the analysis and synthesis of structural-complex information distribution systems, operating in conditions of multiservice traffic. Three traffic types of the multiservice telecommunication networks, which are inherent in separate segments or network as a whole, are classified. The difference degree of traffic is defined by peak-factor of the load. For each of his types the appropriate calculation methods of the characteristics QoS are developed in conditions of processing traffic in information distribution systems, which introduced by such models: $M/D/m/\infty$, $M_B/M/m$, $HM/G/m$, $HM/D/m/\infty$, $fBM/G/1/\infty$, $G/M/1/\infty$ и $G/D/1/\infty$. For model of $G/G/1/\infty$ the analytical intercouplings between all characteristics QoS are established.

For a network of mobile communication the calculation method of probability of a refusal in an allotment of a radio channel, and for the signaling network - method of efficiency rating of a signaling channels at network and transport levels is developed. The automated design engineering system and simulation model of telecommunication systems and networks is developed.

Keywords: a telecommunication multiservice network, model of self-similar traffic, information distribution system, analysis and synthesis.

Список позначень та скорочень

$C_m(\Lambda)$	– С-формула Ерланга
$E_m(\Lambda)$	– В-формула Ерланга
N	– середня кількість вимог у системі
$P_{w>0}$	– імовірність очікування
P_B	– імовірність втрати (блокування) вимоги
Q	– середня довжина черги
S	– коефіцієнт скупченості навантаження (пікфактор трафіка)
T	– середня тривалість перебування вимог у системі
t_q	– середня тривалість очікування вимог у черзі
W	– середня тривалість очікування вимог у системі
x	– тривалість обслуговування вимоги
Y	– інтенсивність обслуженого навантаження
z	– тривалість інтервалу часу між вимогами
λ	– інтенсивність потоку вимог
Λ	– інтенсивність вхідного навантаження
μ	– інтенсивність обслуговування вимог
ρ	– інтенсивність питомого навантаження
<i>FIFO</i>	– <i>First in first out</i> (перший обслуговується першим)
<i>NGN</i>	– <i>Next Generation Networks</i> (мережі наступного покоління)
<i>OSI</i>	– <i>Open System Interconnection</i> (взаємодія відкритих систем)
<i>QoS</i>	– <i>Quality of Service</i> (якість обслуговування)
ВП	– випадковий процес
МА	– мобільний абонент
СКС №7	– спільноканальна сигналізація №7
СМО	– система масового обслуговування
СПІ	– система розподілу інформації

Підписано до друку _____.2010 р. Обсяг 1,9 друк. арк.

Формат 60x88/16 Зам. № _____. Тираж 120 прим.

Віддруковано на видавничому устаткуванні фірми RISO у
друкарні редакційно-видавничого центру

Одеської національної академії зв'язку ім. О.С. Попова.

Україна, 65029, м. Одеса, вул. Старопортофранківська, 61

© ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2010

