УДК 621. 39

МЕТОДИ ПРОЕКТУВАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ТА МЕРЕЖ В УМОВАХ РЕАЛЬНОГО ТРАФІКА

Ложковський А.Г., Вербанов О.В., Колчар В.М., Гордієнко В.Ю.
Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,
65029, Україна, м. Одеса, вул. Ковальська, 1.
aloshk@onat.edu.ua, overbanov@onat.edu.ua, v.kolchar@onat.edu.ua, v.gordienko@onat.edu.ua

МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ И СЕТЕЙ В УСЛОВИЯХ РЕАЛЬНОГО ТРАФИКА

Ложковский А.Г., Вербанов О.В., Колчар В.М., Гордиенко В.Ю.
Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.
aloshk@onat.edu.ua, overbanov@onat.edu.ua, v.kolchar@onat.edu.ua, v.gordienko@onat.edu.ua

METHODS OF DESIGNING OF TELECOMMUNICATION SYSTEMS AND NETWORKS UNDER REAL TRAFFIC

Lozhkovskii A.G., Verbanov O.V., Kolchar V.M., Hordiienko V.Yu.
O.S. Popov Odessa national academy of telecommunications,
1 Kovalska St., Odessa, 65029, Ukraine.
aloshk@onat.edu.ua, overbanov@onat.edu.ua, v.kolchar@onat.edu.ua, v.gordienko@onat.edu.ua

Анотація. Практичними вимірами параметрів трафіка телекомунікаційних мереж визначено, що реальний трафік суттєво відрізняються від моделі пуассонівського потоку і тому для розрахунку якості його обслуговування необхідні інші методи, які відмінні від відомих й адекватні новим моделям трафіка. В роботі систематизовано нові методи розрахунку та проектування телекомунікаційних систем та мереж і надано рекомендації щодо їх застосування.
Ключові слова: телекомунікаційні системи та мережі, методи розрахунку та проектування.

Аннотация. Практическими измерениями параметров трафика телекоммуникационных сетей установлено, что реальный трафик существенно отличается от модели пуассоновского потока и поэтому для расчета качества его обслуживания необходимы иные методы, которые отличны от известных и адекватны новым моделям трафика. В работе систематизированы новые методы расчета и проектирования телекоммуникационных систем и сетей и даны рекомендации по их применению.
Ключевые слова: телекоммуникационные системы и сети, методы расчета и проектирования.

Abstract. Practical measurements traffic of telecomunication network found that the real traffic is significantly different from the model a Poisson stream and therefore to calculate the quality of service it is necessary to other methods that are different from the known and adequate to the new patterns of traffic. In the paper systematized new methods of calculation and design of telecommunication systems and networks and offered recommendations on how to use them.
Key words: telecommunications systems and networks, methods of calculation and design.

Продумана та цілеспрямована стратегія модернізації інформаційних і телекомунікаційних мереж немислима без достовірної оцінки реальної якості обслуговування (*QoS*) трафіка в цих мережах. При системному підході до проблеми підвищення якості надання інформаційних послуг неможливо обійтися без точних математичних методів розрахунку систем розподілу інформації та оцінки якості обслуговування трафіка в реальних умовах формування його потоків. Природа надходження цих потоків та їх обслуговування залежить від конкретного виду системи (концентратор або мультиплексор), ділянки мережі (абонентська або транспортна) та безліч інших факторів [1]. Деякі із задач аналізу і синтезу систем розподілу інформації можна розв'язати за допомогою теорії масового обслуговування методами сучасної математики. Проте весь пакет задач розрахунку систем розподілу інформації для будь-яких із її схем та дисциплін обслуговування вирішено тільки для випадку найпростішої математичної моделі трафіка – моделі пуассонівського потоку заявок. Для цієї моделі відомі всі аналітичні формули для розрахунку основних характеристик якості обслуговування у системах розподілу інформації [2]. Практичні виміри параметрів потоків заявок свідчать, що реальний трафік в телекомунікаційних мережах суттєво відрізняються від моделі пуассонівського потоку тим, що дисперсія кількості заявок за умовну одиницю часу (дисперсія інтенсивності трафіка) σ^2 може в десятки разів перевищувати її математичне сподівання Y (для пуассонівського розподілу $\sigma^2 = Y$). При цьому такі потоки точніше апроксимуються функцією нормального розподілу [3], а у деяких випадках для апроксимації реального трафіка застосовуються й більш складні математичні моделі, наприклад, модель фрактального процесу [4]. Проте для всіх цих моделей трафіка отримано тільки часткові результати або неточні методи розрахунку якості обслуговування, що унеможливлює використовувати їх при проектуванні телекомунікаційних систем та мереж, які функціонують в умовах реального трафіка.

Мета роботи полягає у систематизації нових методів проектування телекомунікаційних систем та мереж і надання рекомендацій щодо їх застосування.

Результати багаторічних статистичних вимірів параметрів трафіка дали змогу виділити три типи реального трафіка, до яких слід вживати певні математичні моделі:

І тип – в моносервісних мережах з однорідним трафіком. Такими, наприклад, є суто телефонні мережі з єдиною послугою телефонного зв’язку, що й зумовлює однорідність трафіка. Найпростіша модель пуассонівського потоку, здебільшого відповідає таким умовам, а значення інтенсивності трафіка та її дисперсії збігаються або достатньо близькі.

ІІ тип – в мультисервісних мережах з різнорідним трафіком. Стрімкий розвиток телекомунікаційних технологій, нові принципи побудови мереж зв’язку, зміна структурного складу абонентів і спектра надаваних послуг – все це фактори, які суттєво впливають на параметри трафіка і його математичну модель. На цьому етапі реальному трафіку властива підвищена нерівномірність трафіка, за якої дисперсія інтенсивності трафіка перевищує її математичне сподівання від 2 до 15 разів. Іноді дане перевищення буває й більшим, але це відбувається або за межами ГНН, або на невеликих пучках каналів [1].

ІІІ тип – в пакетних мережах з мультисервісним трафіком. Трафік, що передається в мультисервісних мережах з комутацією пакетів, має довгострокові залежності в інтенсивності та ще більш суттєво відрізняється від пуассонівського потоку і навіть будь-яких інших потоків, що визначаються одномірною функцією розподілу ймовірності інтервалу часу між моментами надходження пакетів. Більш адекватною моделлю потоків у таких мережах є самоподібні процеси, проте дослідження характеристик якості обслуговування систем розподілу інформації в цих умовах є дуже складною математичною задачею. У мультисервісних пакетних мережах трафік є різнорідним і з певними вимогами до *QoS*. Тут передачу потоків різних служб забезпечує одна і та ж сама мережа з єдиними протоколами та законами управління. Через те, що джерела кожної служби можуть мати різні швидкості передавання інформації та змінювати її в процесі сеансу зв’язку (максимальна та середня швидкості), то об’єднаному потоку пакетів властиве так зване «пачкування» трафіка (*burstness*), вимірюване коефіцієнтом пачкування [5]. Це пачкування обумовлює ще більшу нерівномірність трафіка, за якої дисперсія інтенсивності трафіка перевищує її математичне сподівання від 20 до 60 разів і більше.

Заснування теорії телетрафіка розпочато з наукових праць Ерланга й основні результати цієї теорії отримано в умовах І етапу наведеного аналізу (*B*- і *C*-формула Ерланга для систем з втратами та чергою відповідно). Розвиток теорії подовжено в інших роботах. Для моделі пуассонівського потоку за довільного розподілу тривалості обслуговування в одноканальній системі з чергою абсолютно точним (тому й класичним) вважається результат, отриманий Поллачеком-Хінчиним. Для моделі пуассонівського потоку при постійній тривалості обслуговування в багатоканальній системі з чергами рішення отримано Кроммеліном. Проте воно настільки складне в математичному плані, що на практиці для інженерних розрахунків замість точних аналітичних формул застосовуються відповідні діаграми (криві Кроммеліна). В роботах [6, 7] запропоновано більш простий метод розрахунку основних характеристик якості обслуговування, який базується на апроксимації середньої тривалості затримки заявок у системі *C*-формулою Ерланга. Зокрема основні характеристики якості обслуговування в моделі *M/D/m/*∞ можуть бути знайдені за відомими характеристиками моделі *M/M/m/*∞:

$$P_{w>0}=\frac{D_m(\Lambda)}{2F(k)};\qquad W=\frac{D_m(\Lambda)}{m-\Lambda}F(k+1);\qquad t_q=\frac{1}{m-\Lambda}F\left(k+2\right),$$

де $D_m(\Lambda)$ – *C*-формула Ерланга; $P_{w>0}$ – ймовірність очікування; Λ – інтенсивність трафіка; m – кількість каналів (серверів або умовних портів); W – середня тривалість очікування заявок у системі; t_q – середня тривалість очікування заявок у черзі; $F(k)$ – апроксимуюча функція, що пов'язує однойменні характеристики *QoS* в моделях *M/M/m/*∞ і *M/D/m/*∞ за експонентної та постійної тривалості обслуговування:

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

де $k = 0{,}01\Lambda$ для всіх наведених характеристик.

При розрахунку пропускної здатності пакетної мережі доступу зі змінною довжиною пакетів (припустимо з експонентною тривалістю їх обслуговування) вважалось, що на кожний вузол доступу (ВД) надходить пуассонівський потік пакетів, а стани послідовних ВД незалежні (модель *M/M/m*). Такий підхід може частково й виправданий через простоту та прийнятну, хоча й невідому, похибку. Проте на практиці потоки пакетів внаслідок скінченої кількості джерел описуються моделлю примітивного потоку (моделлю Енгсета), а стани послідовно з'єднаних ВД залежні, оскільки кожний пакет займає в них певну пропускну здатність, і до того ж через втрати змінюється характер трафіка, що надходить на транзитний ВД («зрізуються» піки трафіка і, відповідно, зменшується його дисперсія). Таким чином, використання моделі *M/M/m* призводить до заниження пропускної здатності мережі. Для отримання точних результатів необхідно розраховувати кожний автономний сегмент мережі доступу з каскадним включенням ВД (кластер) в цілому, не поділяючи його на окремі ВД. У [8] запропоновано рекурентний метод розрахунку пропускної здатності пакетної мережі доступу, який дозволяє отримати точні результати у випадку симетричної мережі доступу, і тому дає можливість оцінки похибки наближених інженерних методів розрахунку. Суть методу зводиться до наступного: визначається кількість умовних каналів так, щоб не перевищувались нормативні втрати заявок на установлення з'єднання в цілому, а далі визначається для кожного такого каналу швидкість передавання так, щоб не перевищувалась норма втрат пакетів. Тоді легко розраховується необхідна смуга пропускання в Мбіт/с кожного напряму зв'язку. У [8] із застосуванням формули Енгсета аналітично отримано просте для розрахунків рекурентне співвідношення ймовірностей наявності в кластері j з'єднань $B_j(m)$:

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

За допомогою цього співвідношення послідовно визначаються всі значення $B_j(m)$, за якими достатньо просто розраховуються характеристики якості обслуговування:

$$P_i = \frac{\sum_{l=0}^{i} C_N^l \alpha_2^l C_{N-l}^{i-l} \alpha_1^{i-l} \sum_{j=0}^{V-l} B_j(m-1)}{\sum_{x=0}^{V} B_x(m)}, \qquad \Pi_j = \frac{B_j(m)}{\sum_{x=0}^{V} B_x(m)}, \tag{1}$$

де P_i – імовірність занятості i умовних каналів для ВД під час зв'язку всередині кластера; Π_j – ймовірність зайнятості j умовних каналів у напряму до транспортної мережі; m – кількість ВД у кластері.

Із запровадженням нових послуг та пов'язаним з цим наданням мережам властивості мультисервісності (II етап) характеристики трафіка суттєво змінилися і найпростіша математична модель пуссонівського потоку не забезпечувала її адекватності реальним процесам, що відбувались в мережі. Ступінь відхилення реального потоку від пуассонівського може бути визначена через пікфактор інтенсивності трафіка S:

$$S = \sigma^2 / \Lambda,$$

де σ^2 – дисперсія інтенсивності трафіка; Λ – її математичне сподівання. Для пуссонівського потоку $S \equiv 1$, а в мережах з різнорідним трафіком $S = 2\ldots15$, що підтверджено статистичними даними практичних вимірів параметрів трафіка [1]. Даним дослідженням установлено, що кращий ступінь узгодження реальних потоків трафіка з теоретичними законами розподілу спостерігається при апроксимації їх рекурентним потоком Пальма з гіперекспонентним (H) розподілом інтервалу часу між заявками (достатньо двох експонент). При цьому розподіл ймовірностей P_i випадкової величини i (кількості заявок в умовну одиницю часу) описується нормальним (Гаусса) законом розподілу. На основі нормального розподілу інтенсивності трафіка в [9] запропоновано та в [10] впроваджено нову методику оцінювання ймовірності втрат заявок P_c, яка враховує пікфактор інтенсивності трафіка S:

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

де k – коефіцієнт, що дорівнює 18.0, 4.25, 3.55 та 2.85 для регулярного, рівномірного, експоненціального та логарифмічно нормального (при $var = 3$) законів розподілу тривалості обслуговування відповідно.

Відомо, що при $S = 1$ або за умови $\Lambda = \sigma^2$ нормальний випадковий процес також є *марковським* і тому значення ймовірностей, розрахованих за B-формулою Ерланга та запропонованим методом, досить близько збігаються (розбіжності не більше 5 %). Якщо B- формула істинна за будь-якого закону розподілу тривалості обслуговування (згідно з ергодичною теоремою для *марковських* процесів Севастьянова), то при $S \neq 1$ або зростанні дисперсії σ^2 нормальний процес стає значно складнішим. При цьому розподіл інтервалів часу між заявками вже не є експонентним, потік заявок втрачає властивість відсутності післядії, а процес обслуговування втрачає ергодичну властивість. Через те ймовірність втрат заявок починає залежати від початкового стану системи та закону розподілу тривалості обслуговування. Ступінь впливу законів розподілу тривалості обслуговування на ймовірність втрат заявок у цих умовах досліджено в [11] за допомогою імітаційної моделі [12].

Запропонований метод дозволив удосконалити методику розрахунку якості обслуговування абонентів рухомого зв'язку [13], оскільки і в цих мережах моделі потоків трафіка не є пуассонівськими.

При проектуванні систем розподілу інформації необхідно знати окремі ймовірності функції розподілу станів системи P_j. Для пуассонівського потоку ця задача вирішується відомим розподілом Ерланга, для примітивного – розподілом Енгсета або розподілом (1) для випадку симетричного кластера пакетної мережі. Для реальних потоків мультисервісних мереж, що апроксимуються рекурентним потоком Пальма у випадку регулярного закону тривалості обслуговування (наприклад, постійна тривалість роботи керуючих пристроїв вузлів комутації або обробки пакетів). У цьому випадку застосування для розрахунку вкладених ланцюгів Маркова неможливо, оскільки в методі вкладених ланцюгів Маркова кількість неекспонентно розподілених величин не може бути більше, ніж одна (інтервал часу між заявками вже має не експонентний розподіл). На основі нормального розподілу інтенсивності трафіка в [14] аналітичним шляхом отримано метод розрахунку стаціонарних імовірностей станів системи типу *H*/*D*/*m*:

$$P_j = \frac{1}{\sum\limits_{i=0}^{m} \exp\left[\frac{-(i-2\Lambda+j)(i-j)}{2\sigma^2}\right]}.$$

Перевірка точності запропонованого методу за допомогою імітаційного моделювання в широкому діапазоні зміни параметрів трафіка Λ, σ^2 та ємності системи m показала, що відносна похибка запропонованої апроксимації не перевищує 1% для всіх значень P_j.

В телекомунікаційних системах потоки трафіка можуть обслуговуватись не тільки за дисципліною обслуговування з явними втратами, як в телефонних мережах, але й з умовними втратами або з організацією черги, як в мережах *ATM*, *IP* та інших. Для моделі $H/D/m/\infty$ в [15] запропоновано новий метод розрахунку систем розподілу інформації з чергою за умови обслуговування реального потоку трафіка. В основі даного методу лежить апроксимація середньої тривалості очікування заявок у черзі t_q, яку уточнено за допомогою імітаційної моделі, розробленої в [16].

Апроксимація середньої тривалості очікування заявок у черзі t_q базується на наступних відомих результатах [2]:

- із *C*-формули Ерланга випливає, що у системі $M/M/m/r{=}\infty$ середня тривалість очікування для затриманих заявок $t_{\text{експ}} = 1 / (m - \Lambda)$;
- із формули Поллачека-Хінчина випливає, що у системі $M/D/1/r{=}\infty$ середня тривалість очікування для затриманих заявок $t_{\text{пост}} = t_{\text{експ}} / 2$.

Очевидно, що в шуканій формулі для розрахунку t_q системи $H/D/m/r{=}\infty$ маютьураховуватись дані результати. Перший – тому, що пуассонівський потік (*M*) є окремим випадком рекурентного (*H*). Другий – тому, що одноканальна система ($m = 1$) є окремим випадком багатоканальної. В роботі [18] для системи $H/D/m/r{=}\infty$ при обслуговуванні у порядку черги (*FIFO*) показано, що t_q більше $t_{\text{експ}}$ в $S / 2$ раз за ємності системи $m = \Lambda$. Даний факт добре узгоджується з наведеними відомими співвідношеннями – враховано і відмінність рекурентного потоку від пуассонівського через пікфактор S, і відмінність в два рази середньої тривалості очікування за постійної та експонентної тривалості обслуговування, але віднесено це до характерної точки $m = \Lambda$. При збільшенні m це співвідношення убуває зі швидкістю $(m + \Lambda + 1 + \Lambda / m) / m$.

Середня тривалість очікування заявок у черзі t_q для моделі $H/D/m/r{=}\infty$ розраховується за формулою:

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

Ймовірність очікування $P_{W>0}$ дорівнює ймовірності того, що нова заявка, яка надходить у систему, застає всі m каналів зайнятими:

$$P_{W>0} = \sum_{j=m}^{\infty} P_j = 1 - \sum_{j=0}^{m-1} P_j, \tag{2}$$

де j – стан системи ($0 \le j \le m$ – канали; $m < j \le \infty$ – черга). За постійної тривалості обслуговування t і відсутності явних втрат властивості потоку звільнення збігаються з властивостями потоку прибуваючих на обслуговування заявок, тому що відбувається тільки зсув у часі на величину t між моментом надходження заявки і моментом закінчення її обслуговування. При цьому стани системи повністю визначаються властивостями потоку прибуваючих заявок, а функції розподілу кількості заявок у системі (стану системи) P_j і кількості прибуваючих заявок P_i за час t повністю збігаються. Оскільки потік прибуваючих заявок описується нормальним розподілом, то ймовірність $P_{W>0}$ теж розраховується з використанням нормального закону розподілу з параметрами Λ та σ^2 вхідного потоку заявок.

Далі за розрахованими t_q і $P_{W>0}$ визначаються середня тривалість очікування заявок у системі W і середня довжина черги Q:

$$W = t_q P_{W>0}; \qquad Q = \Lambda W. \tag{3}$$

Проте фактично на канали системи надходять заявки із первинного потоку з інтенсивністю Λ та із черги з інтенсивністю $\Lambda P_{W>0} t_q$, оскільки заявки, що очікують у черзі, утворюють додатковий потік з інтенсивністю $\Lambda \cdot P_{W>0}$ і кожна затримана заявка очікує у середньому час t_q. Тому загальна інтенсивність трафіка на канали збільшується до $\Lambda_2 = \Lambda + Q$, оскільки t_q $P_{W>0}$ – це середня тривалість очікування W, а ΛW – це середня довжина черги Q (3). Крім того, додатковий потік заявок із черги не тільки збільшує загальну інтенсивність трафіка з Λ до $\Lambda_2 = \Lambda + Q$, але й її дисперсію – з σ^2 до $\sigma_2^2 \approx (\sigma + Q / 2)^2$. Через те розрахунок ймовірності $P_{W>0}$ (2) повторюється ще раз з новими значеннями Λ_2 та σ_2^2, після чого повторюються й розрахунки W та Q (3).

Іноді вимушено для розрахунків параметрів *QoS* при обслуговуванні реального трафіка (модель $H/D/m/r=\infty$) застосовують *C*-формулу Ерланга або метод Кроммеліна, але це є помилкою, оскільки похибка розрахунку у такому випадку складає 50-90 %, а похибка запропонованого методу не перевищує 5 %.

Нові методи розрахунку для трафіка III типу

Побудова мереж нового покоління (NGN) – найбільш актуальна задача в телекомунікаціях на сучасному етапі розвитку. Мультисервісні мережі NGN базуються на технології комутації пакетів. Трафік у пакетних мережах може бути описаним самоподібним (*self-similarity*) випадковим процесом з параметром Херста 0,65 … 0,8, проте дослідження параметрів *QoS* у цих умовах є досить складною математичною задачею, а вплив явища самоподібності трафіка на пропускну здатність мережі ще не досліджено повною мірою. Причиною цьому є слабка формалізованість моделі самоподібних потоків, внаслідок чого й неможливо отримати аналітично обґрунтовані результати для оцінки параметрів *QoS*.

Випадковий процес (ВП) надходження пакетів у СМО на обслуговування, що утворює потік пакетів (трафік), характеризується законом розподілу, який установлює зв'язок між значенням випадкової величини (кількістю пакетів) й імовірністю появи цього значення. У більшості випадків для розрахунку параметрів *QoS* досить знати про закон розподілу тільки деякі його числові характеристики – моменти розподілу різних порядків. Для розрахунку в умовах пуассонівського розподілу достатньо математичного сподівання M, а для нормального розподілу – необхідно мати значення M і дисперсії D.

Основні характеристики випадкового процесу M і D, хоча й досить важливі, у той самий час не є вичерпними, а іноді й марними для прогнозування значення випадкової величини. Іноді ВП характеризуються однаковими значеннями M і D, але внутрішня структура цих процесів різна. Одні можуть мати плавно мінливі реалізації, а інші – яскраво виражену коливальну структуру за стрибкоподібної зміни окремих значень випадкової величини (наприклад, різке зростання кількості пакетів у мережі, що призводить до „пачкування” трафіка). Для «плавних» процесів характерна значна передбачуваність реалізацій, а для „пачкових” – дуже мала ймовірнісна залежність між двома випадковими величинами ВП. У таких випадках закон розподілу, що характеризує ВП, несе у собі деяку невизначеність і дозволяє з більшою або меншою надійністю прогнозувати значення випадкової величини.

Таким чином, використовувані ймовірнісні закони розподілу, що описують трафік у пакетних мережах, не дають такої кількісної оцінки невизначеності стану системи масового обслуговування, як ентропія розподілу:

$$H(m) = -\sum_{j=1}^{m} P_j \log P_j \,.$$

Ентропія не залежить від значень величини, а тільки від їхніх імовірностей.

Для оцінки параметрів якості обслуговування самоподібного трафіка в [18] запропоновано ентропійний метод розрахунку параметрів *QoS*, який зводиться до використання методів розрахунку відомих розподілів, ентропія яких збігається або найбільш близька до ентропії станів системи при обслуговуванні самоподібного трафіка.

Для обґрунтування можливості застосування методів розрахунку параметрів якості обслуговування відомих моделей, наприклад таких, як *M/M/*1, *M/D/*1, *M/E/*1 або *M/H/*1 (для всіх $r=\infty$ – нескінчена черга) в умовах самоподібного трафіка (модель *fBM* – фрактальний броунівський рух) використано імітаційне моделювання. За допомогою спеціально розробленого алгоритму [16] виконано моделювання одноканальної СМО з чергою при обслуговуванні самоподібного трафіка. Наприклад, для постійної тривалості обслуговування коефіцієнт Херста змінювався в межах $H = 0{,}55 \ldots 0{,}9$, а завантаження системи (інтенсивність) – у межах $\rho = 0{,}1 \ldots 0{,}9$. Для заданих умов розраховувалась ентропія розподілу станів системи. Результатами моделювання установлено, що в тих точках, де однакова ентропія розподілу станів системи, однакові й досліджувані параметри якості обслуговування, такі як середня довжина черги *Q* та середня тривалість очікування заявок *W*. Наприклад, для моделей *M/M/*1 і *fBM/D/*1 ($H = 0{,}8$) при $\rho = 0{,}6$ ентропії розподілів досить близькі і дорівнюють 1,683 і 1,719 відповідно. При цьому для моделі *fBM/D/*1/$r=\infty$ середня довжина черги $Q = 0{,}982$ і середня тривалість очікування всіх заявок $W = 1{,}611$, що перевищує відповідні значення для моделі *M/M/*1/$r=\infty$ усього на 3% (на стільки ж відмінність і значень ентропії). Такий самий збіг основних параметрів якості обслуговування СМО з чергою спостерігається в усіх інших точках, для яких однакові значення ентропії розподілу станів системи. Основними параметрами є: N – середня кількість заявок у системі; T – середня тривалість перебування заявок у системі; Q – середня довжина черги і W – тривалість очікування заявок.

Для розрахунків можна застосовувати формулу Поллачека-Хінчина, призначеної для моделі *M/G/*1/$r=\infty$:

$$N = \rho + \rho^2 \frac{1 + C^2}{2(1-\rho)},$$

де N – середня кількість заявок у системі, C – коефіцієнт варіації тривалості обслуговування. Визначивши цей параметр, інші характеристики розраховуються через відомі співвідношення та формулу Літтла:

$$Q = N - \rho\,; \qquad T = \frac{N}{\rho}\,; \qquad W = T - 1\,.$$

Алгоритм застосування ентропійного методу розрахунку *QoS* такий:

1. Для установленого закону розподілу станів системи визначається ентропія розподілу H_{fBM} (за відомими формулами).

2. Зміною коефіцієнта варіації *C* для моделі $M/H/1/r=\infty$ досягається збіг значень ентропії $H_{M/H/1} = H_{fBM}$.

3. За допомогою знайденого коефіцієнта варіації С визначається середня кількість пакетів у системі *N* за формулою Поллачека-Хінчина.

4. Через відомі співвідношення визначаються інші характеристики *QoS*.

Установлено, що, змінюючи коефіцієнт варіації тривалості обслуговування *var* від 0 до 5 графіки ентропії „накривають” практично всю область можливих значень ентропії розподілів станів системи в моделях *fBM/D/*1, *fBM/M/*1 або *fBM/LogN/*1 при зміні коефіцієнта Херста в діапазоні від H = 0,55 до H = 0,9. Таким чином, розрахунок параметрів *QoS* в моделі з самоподібним трафіком за будь-якого закону розподілу тривалості обслуговування теж можливий запропонованим методом. Необхідною умовою такого розрахунку є визначення ентропії розподілу станів системи.

В [4] продемонстровано, що запропоноване Норосом аналітичне рішення для системи $fBM/D/1/r=\infty$ у багатьох випадках є дуже приблизною оцінкою з похибкою до сотні відсотків, у зв’язку з чим кращим є ентропійний метод оцінки параметрів якості обслуговування самоподібного трафіка.

Всі запропоновані методи враховують сучасний стан розвитку телекомунікаційних технологій, нові принципи побудови мереж зв’язку, зміну структурного складу абонентів і розширення спектра надаваних послуг. Саме ці фактори і є першопричиною еволюційної зміни структури реального трафіка інфокомунікаційних мереж, що вимагало для адекватного його опису такої самої поступової зміни застосовуваних математичних моделей трафіка – від найпростішої пуассонівської моделі до моделі фрактальних або самоподібних процесів. Для трафіка II типу в якості інтегруючої оцінки всіх впливів на структуру трафіка вищенаведених факторів запропоновано застосовувати величину дисперсії інтенсивності трафіка, яка свідчить про ступінь розбіжності окремих значень випадкової кількості заявок потоку трафіка та її середнього значення. У трафіка III типу за пакетних технологій через властивості „пачкування” структура реального трафіка так змінилась, що використання для опису суттєво збільшеної нерівномірності трафіка тільки оцінки дисперсії вже не забезпечило адекватності будь-якої з класичних моделей теорії телетрафіка реальній структурі мультисервісного трафіка. Тому для цього й запозичена математична модель із інших наук, але застосування якої ще не досліджено повною мірою через слабку формалізованість моделі самоподібних потоків, внаслідок чого й неможливо отримати аналітично обґрунтовані результати для оцінки параметрів *QoS* у системах розподілу інформації.

Проектування телекомунікаційних систем на основі адекватних методів розрахунку, що враховують реальний характер трафіка, дозволить забезпечити відчутну економію витрат на будівництво та експлуатацію мереж зв’язку. Завдяки правильному розрахунку підвищиться якість обслуговування й пропускна здатність систем розподілу інформації.

Нові методи оцінки якості обслуговування можуть бути застосовані у системах динамічного керування мережею для перерозподілу ресурсів мережі та оптимізації трафіка і мережі в цілому на основі заданої (нормованої) якості обслуговування.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Ложковський А.Г. Дослідження впливу параметрів навантаження на характеристики якості обслуговування: дис. … канд. техн. наук : спец. 05.12.02 / Ложковський Анатолій Григорович. – Одеса, 2003. – 160 с.
2. Шнепс М.А. Системы распределения информации. Методы расчета: справ. пособ. – М.: Связь. – 1979. – 344 с., ил.
3. Ложковский А.Г. Методы расчета качества обслуживания в мультисервисных сетях связи : The 2-nd International Conference [„Telecom-munication, Electronics and Informatics”]. – Chishinau, 2008. – P. 117–126.

4. 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. ІПМЕ НАН України. – Вип. 47. – К.: 2008. – С. 187–193
5. Ложковский А.Г. Методы расчёта телекоммуникационного оборудования в условиях реального потока вызовов / А.Г. Ложковский, Н.В. Захарченко // Вісник укр. Будинку економічних та наукових знань. – К.: 2004. – № 4 – С. 102–109.
6. Ложковський А.Г. Простий метод розрахунку багатоканальної системи з чергою в моделі M/D/m/∞ (Задача Кроммеліна) / А.Г. Ложковський // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2008. – № 2. – С. 69–76.
7. Ложковський А.Г. Розрахунок якості обслуговування в пакетній мережі при необмеженій довжіні накопичувального буфера / А.Г. Ложковський // Зв'язок. – 2009. – № 2. – С. 54–58.
8. 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. 3–7
9. Ложковський А.Г. Нова методика оцінювання ймовірності втрат викликів, наближена до реальних умов / А.Г. Ложковський // Зв'язок. – 2004. – № 3. – С. 52–53.
10. Відомчі будівельні норми України. Проектування телекомунікацій. ВБН В.2.2-33-2007. Споруди станційні місцевих телефонних мереж / [А.П. Баєв М.О. Чумак., Ложковський А.Г. та ін.]. – К, – 2007. – 98 с.
11. 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.
12. Ложковский А.Г. Статистическое моделирование полнодоступного пучка с потерями / А.Г. Ложковский // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2003. – № 1. – С.75–82.
13. Ложковский А.Г. Метод расчета качества обслуживания абонентов подвижной связи / А.Г. Ложковский // Труды УНИИРТ. – 2004. – № 3. – С.21–23.
14. 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.
15. Ложковский А.Г. Метод расчета систем обслуживания с ожиданием при произвольном потоке вызовов / А.Г. Ложковский // Зв'язок. – 2006. – № 1. – С. 57–60.
16. 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.
17. Ложковский А.Г. Исследование системы обслуживания с ожиданием и рекуррентным потоков вызовов / А.Г. Ложковский // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2004. – № 2. – С. 56–59.
18. 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.

REFERENCES:

1. Lozhkovskii A.G. The influence of parameters of the load characteristics on service quality: Thesis. candidate. Sc. sciences specials: 05.12.02. / Anatoliy Lozhkovskii, Odessa, 2003. – 160 p.
2. Shneps M.A. Systems apportionment of information. Methods of calculation: Handbook. - M .: Communications. – 1979. – 344 p.
3. Lozhkovskii A.G. Methods for Calculating Quality of Service in multiservice communication networks: The 2-nd International Conference ["Telecommunication, Electronics and Informatics"]. – Chishinau, 2008. – P. 117-126.
4. Lozhkovskii A.G. Comparative analysis of methods for calculating the quality of service characteristics with self-similar flows in the network / A.G. Lozhkovskii // Modeling and Information Technologies: Coll. Science. pr. IPM NAS of Ukraine. – Vol. 47 – K.: 2008. – P. 187-193
5. Lozhkovskii A.G., Zakharchenko N.V. Calculation methods of telecommunications equipment with a real call flow // Ukrainian Herald. House of economic and scientific knowledge. – 2004. – № 4 – P. 102-109.
6. Lozhkovskii A.G. A simple method for calculating multi-channels system with queue in model M/D/m/∞ (Task of Krommelin) / A.G. Lozhkovskii // Scientific works of O.S. Popov ONAT. – 2008. – № 2. – P. 69-76.
7. Lozhkovskii A.G. The calculation of service quality in packet networks with unlimited length accumulation buffer / A.G. Lozhkovskii // Communication. – 2009. – № 2. – P. 54-58.

8. Lozhkovskii A.G. Recurrence calculate method for bandwidth packet-based network access / A.G. Lozhkovskii, N.S. Salmanov, N.A. Chumak // Scientific works of O.S. Popov ONAT. – 2006. – № 2. – P. 3-7.
9. Lozhkovskii A.G. A new method of evaluating the probability of loss, close to the real conditions / A.G. Lozhkovskii // Communication. – 2004. – № 3. – P. 52-53.
10. Institutional building codes Ukraine. Designing telecommunications. VBN V.2.2-33-2007. Buildings for the station telephone networks / [A.P. Baev N.A. Chumak., A.G. Lozhkovskii. et al.]. – K ., 2007. – 98 p.
11. Lozhkovskii A.G. The influence of the distribution of the duration of employment on service quality real flow of calls / A.G. Lozhkovskii // Scientific works of O.S. Popov ONAT. – 2003. – №4. – P.26-28.
12. Lozhkovskii A.G. Statistical modeling of the full accesses system with blocking / A.G. Lozhkovskii // Scientific works of O.S. Popov ONAT. – 2003. – № 1. – P. 75-82.
13. Lozhkovskii A.G. Method of calculating the quality of service of mobile subscribers / A.G. Lozhkovskii // Proceedings UNYYRT. – 2004. – № 3. – P. 21-23.
14. Lozhkovskii A.G. Method of calculating the stationary probability distribution of states in the Palm model / A.G. Lozhkovskii // Scientific works of O.S. Popov ONAT. – 2005. – № 1. - P. 58-62.
15. Lozhkovskii A.G. Method of calculation of maintenance system with delay in arbitrary streams of calls / A.G. Lozhkovskii // Communication. – 2006. – № 1. – P. 57-60.
16. Lozhkovskii A.G. Simulation of multi-channel queuing system with queuing / A.G. Lozhkovskii, N.S. Salmanov, O.V. Verbanov // Eastern European journal of advanced technologies. – 2007. – № 3 / 6 (27). – P. 72-76.
17. Lozhkovskii A.G. Investigation of maintenance system with delay and recurrence streams of calls / A.G. Lozhkovskii // Scientific works of O.S. Popov ONAT. – 2004. – № 2. – P. 56-59.
18. Lozhkovskii A.G. Entropy method of evaluation of QoS parameters of self-similar traffic / A.G. Lozhkovskii, R.A. Hanyfaev // Scientific works of O.S. Popov ONAT. – 2008. – № 1. – P. 57-62.