УДК 621.395

Ложковський А.Г., Ганчев В.В., Гордієнко В.Ю.
Ложковский А.Г., Ганчев В.В., Гордиенко В.Ю.
Lozhkovskii A.G., Ganchev V.V., Gordienko V.Y.

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ В УМОВАХ ПАКЕТНОГО ТРАФІКА ДЛЯ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ЙОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ ПАКЕТНОГО ТРАФИКА ДЛЯ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЕГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

MODELING OF THE TELECOMMUNICATION SYSTEMS IN CONDITION OF THE PACKET TRAFFIC FOR AN ESTIMATION OF QUALITY OF HIS SERVICE

Анотація. Розроблено метод моделювання одноканальної телекомунікаційної системи з чергою та обробленнями заявок в порядку надходження. Досліджуються характеристики якості обслуговування пакетного трафіка.

Аннотация. Разработан метод моделирования одноканальной телекоммуникационной системы с очередью и обработкой заявок в порядке поступления. Исследуются характеристики качества обслуживания пакетного трафика.

Summary. The method of modeling single-channel telecommunication system with queue and processing the demands in consecutive order is developed. The quality of service of packet traffic are researched.

Оцінка характеристик якості обслуговування (QoS) мультисервісного пакетного трафіка – дуже складна математична задача [1 … 3]. У сучасних телекомунікаційних системах (ТКС) з пакетним передаванням інформації трафік є пачковим («пачечным» – *рос.*) і має так звану властивість самоподібності. Пачковість трафіка оцінюється відношенням пікової інтенсивності надходження пакетів до її середнього значення. Пачковий або самоподібний трафік незручний при обробці, оскільки для забезпечення заданого рівня QoS необхідно збільшувати пропускну здатність каналів зв'язку. Властивість самоподібності (масштабної інваріантості) сильно ускладнює задачу аналізу ТКС, оскільки пачковий трафік зберігає свої властивості при агрегації й об'єднанні (суперпозиції) декількох потоків у магістральному каналі і тому процес у магістральному каналі сучасної ТКС з пакетним передаванням даних також є пачковим і недостатньо згладжується при збільшенні кількості потоків.

Математичні моделі функціонування ТКС, здебільшого, орієнтовані на можливість отримання аналітичних рішень для обумовлених характеристик QoS. Можливість отримання таких рішень суттєво обмежується видом трафіка, законом розподілу тривалості обслуговування та структурою ТКС. Використання методів моделювання дозволяє суттєво послабити ті обмеження, які відносяться до виду трафіка. Таким чином, основним інструментарієм дослідження задач, що не піддаються аналітичним і чисельним методам, є імітаційне моделювання. Однак відсутні методи моделювання ТКС, які б дозволяли дати оцінки якості обслуговування пакетного трафіка з урахуванням ентропії розподілу станів системи [1, 2]. Метою даної статті є розробка методу моделювання ТКС та дослідження характеристик якості обслуговування пакетного трафіка.

Випадковий процес (ВП) надходження пакетів у ТКС на обслуговування, що утворює потік пакетів (трафік), характеризується законом розподілу, який встановлює зв'язок між значенням випадкової величини (кількістю пакетів) й імовірністю появи цього значення. Основні характеристики ВП, такі як середнє значення M і дисперсія D кількості пакетів за одиницю часу, хоча й досить важливі, але не є повними, а інколи й недостатніми 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 при стрибкоподібній зміні окремих значень випадкової величини (наприклад, різке зростання кількості пакетів у мережі, що призводить до «пачковості – *burstness*» 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. Таким чином, використовувані ймовірнісні закони розподілу, що описують трафік у телекомунікаційних мережах не дають такої кількісної оцінки невизначеності стану системи, як ентропія розподілу:

$$H(m) = -\sum_{i=1}^{m} p_i \log p_i . \qquad (1)$$

Оскільки прості та точні формули розрахунку характеристик якості обслуговування ТКС вдається отримати тільки в найпростіших випадках, то для дослідження складних систем в умовах самоподібного трафіка використовується імітаційне моделювання. Для цього проаналізовано можливі способи імітаційного моделювання і розроблено спеціальний алгоритм та відповідна комп’ютерна програма.

Процес надходження у систему заявок на обслуговування моделюється як рекурентний, де момент прибуття чергової заявки утворюється додаванням випадкового інтервалу часу до попереднього. Випадкові інтервали між заявками формуються за розподілом Парето, яке при моделюванні здобуто шляхом переходу від рівномірного розподілу методом зворотної функції [2]:

$$Z_i = \frac{b}{\sqrt[a]{U_i}}, \qquad (2)$$

де Z_i – i-й інтервал часу між заявками; a – параметр форми розподілу; b – мода розподілу; U_i – випадкове число, рівномірно розподілене на інтервалі [0, 1]. Оскільки при $a \le 2$ дисперсія нескінченна, то саме цей розподіл з нескінченною дисперсією та з «довгим хвостом», яким є розподіл Парето, дозволяє моделювати потоки трафіка з ефектом самоподібності. Параметр форми a розподілу Парето обумовлює для генерованого потоку значення параметра Херста:

$$H = \frac{3 - a}{2}, \qquad (3)$$

яке для самоподібного трафіка може бути в діапазоні 0,5…1 [1]. Виявлення властивості самоподібності генерованого трафіка можна виконати методом абсолютних моментів, в якому як значення випадкового процесу розглядається кількість заявок, що надходить в телекомунікаційну систему за одиницю часу. Для цього необхідно вихідну послідовність кількості заявок довжиною N розділити на блоки довжиною m (окремі агреговані процеси розміром m) і розрахувати значення дисперсій кожного з них та кореляційну функцію. Для самоподібного трафіка дисперсія агрегованих процесів зменшується повільніше, ніж величина, яка є зворотна до розміру вибірки m. Для виявлення цього явища використовується дисперсійно-часовий графік залежності дисперсій агрегованих процесів від ступеня агрегації m [1].

При моделюванні доводиться вирішувати наступні завдання:

1. Отримання послідовності випадкових чисел, рівномірно розподілених в інтервалі [0, 1].

2. Перетворення чисел отриманої послідовності у величини, що мають деяку певну функцію розподілу.

3. Побудова логічної схеми алгоритму, що враховує особливості роботи системи масового обслуговування (СМО), яка моделюється.

4. Побудова алгоритмів фіксації станів СМО й оброблення результатів моделювання.

5. Вибір кількості реалізацій у відповідності до заданої точності обумовлених характеристик СМО.

6. Моделювання на ЕОМ.

7. Остаточне оброблення й аналіз результатів.

Для обґрунтування «випадковості» послідовності псевдовипадкових чисел необхідно використати систему наступних тестів: перевірка частот повторення чисел з різних інтервалів, перевірка пар чисел, перевірка інтервалів, перевірка комбінацій.

Множина псевдовипадкових чисел, що задовольняє всім цим тестам, називається локально випадковою. Всі згадані вище тести характеризуються однією загальною властивістю: випробовувані псевдовипадкові числа (або розряди в них) класифікуються за деякими ознаками (різними для кожного тесту) й отриманий емпіричний розподіл порівнюється з теоретичним. Для порівняння використовуються звичайні статистичні критерії.

Для моделювання потоків подій необхідно користуватися алгоритмами, за якими б вироблялися випадкові величини, що відповідають тривалостям інтервалів часу між сусідніми подіями необхідного виду потоку. Можлива нестаціонарність потоків може бути врахована уведенням в алгоритм формування випадкових величин залежності від поточного часу надходження (або початку обслуговування) певної вимоги. Ці випадкові величини повинні бути розподілені за певним законом, тобто має місце завдання отримання послідовності випадкових величин з певною функцією розподілу.

Схему алгоритму моделювання однолінійної телекомунікаційної системи з чергою та обслуговуванням заявок в порядку надходження як системи масового обслуговування, наведено на рис. 1. Тут використовуються підпрограми реалізації двох випадкових величин: згідно з функцією розподілу проміжків часу між заявками $A(t)$ і функції розподілу тривалості обслуговування $B(t)$. Робота системи завершується в разі обслуговування *n* заявок. Початковий стан відповідає відсутності заявок у системі. Потоки заявок ординарні із заданою функцією розподілу інтервалів часу між сусідніми заявками Z_i.

Для схеми моделювання використано такі оператори:

1 – початкова установка *i*-значення лічильника числа реалізацій і *k*–значення лічильника кількості заявок, надходження яких збіглося з простоєм СМО (по всіх реалізаціях);

2 – установка початкового значення *j* – номера поточної заявки; t_{j-1} – значення моменту надходження в СМО (*j*-1)-ї заявки та Θ_{j-1} – значення моменту виходу (*j*-1)-ї заявки (для кожної реалізації);

3 – формування величини t_j, причому *Z* – величина проміжку часу між моментами надходження (*j*-1) та *j*-ї заявки, сукупність цих величин розподілена за законом $A(t)$;

4 – логічний оператор, що дозволяє з'ясувати стан СМО (простою або роботи) в момент приходу *j*-ї заявки;

5 – підрахунок кількості надходження заявок в СМО, за яких система простоювала (по всіх реалізаціях);

6, 7 – оператори формування значення t''_j – моменту початку обслуговування *j*-ї заявки;

8 – оператор формування Θ_j, причому τ_j – тривалість обслуговування *j*-ї заявки, де сукупність цих величин розподілена за законом $B(t)$;

9 – оператор переіндексації *j* – номера поточної заявки;

10 – логічний оператор, що служить для фіксації завершення обслуговування *n*-ї заявки (для кожної реалізації);

11 – лічильник кількості реалізацій;

12 – логічний оператор, що з'ясовує момент закінчення *m*-ї реалізації;

13 – оператор друкування результату моделювання.

Із блок-схеми рис. 1 видно, що всі оператори поділяються на два типи:

1. Оператори, призначені безпосередньо для моделювання процесів у СМО (*1*, *2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12).*

2. Оператори, призначені для фіксації, оброблення й видачі характеристик, що визначаються *(5, 13).*

Сукупність операторів першого типу обумовлюється структурою СМО, що моделюється, дисципліною проходження заявок і т. д. Оператори другого типа залежать від параметрів, що визначаються.

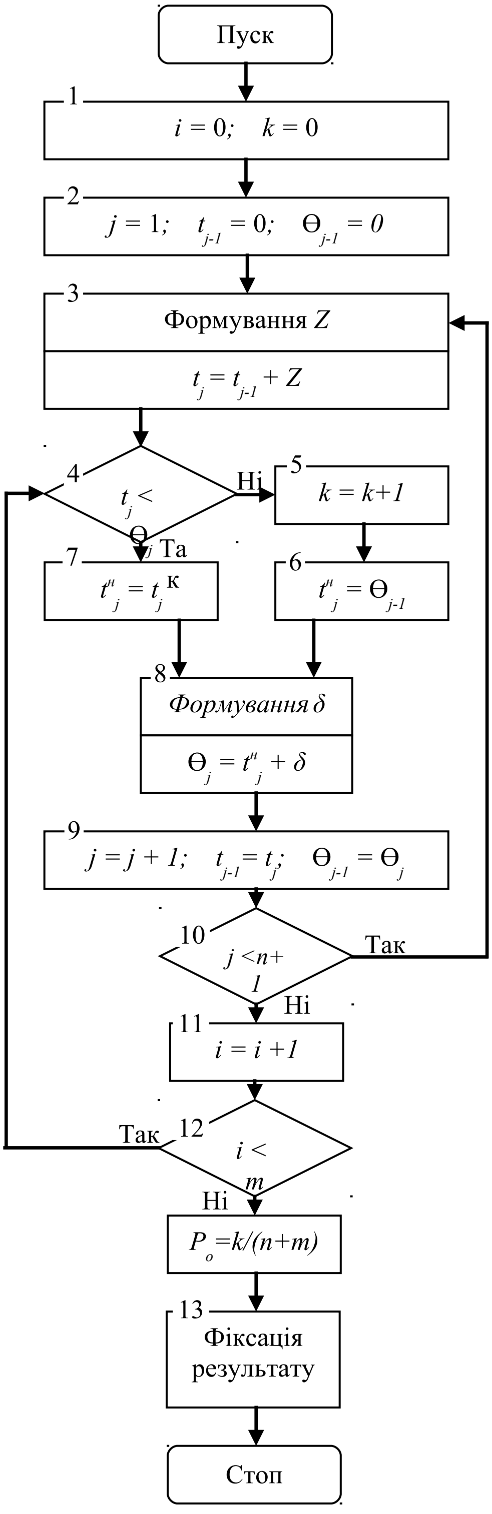

Рисунок 1 – Блок-схема імітаційної моделі

У відповідності з наведеним алгоритмом у середовищі програмування *Visual Basic* 6 *SP*6 розроблено програму імітаційного моделювання системи обслуговування потоків заявок. У програмі передбачено два генератори випадкових величин *A(t)* і *B(t)* з можливістю завдання всіх необхідних імовірнісно-часових характеристик цих величин. Наприклад, тривалість обслуговування заявок може бути розподілена за експонентним, гіпер-експонентним, регулярним, рівномірним і логарифмічно нормальним законами. Модель дозволяє отримати стаціонарний розподіл станів системи та черги, а також всі оцінки параметрів якості функціонування одноканальної системи.

Моделюванням у відповідності з розробленою блок-схемою встановлено, що у разі обслуговування самоподібного трафіка зі зростанням інтенсивності навантаження ρ погіршуються характеристики якості обслуговування або знижується пропускна здатність, але не настільки, як це передбачається за методом Норроса [3]. Розбіжність результатів моделювання й оцінок, отримуваних за формулою Норроса може бути до сотні відсотків [4]. Очевидно, що оцінка Норроса значно завищена, тому необхідне знаходження більш точного розв’язання.

Результати імітаційного моделювання системи типу *fBM/D/1* при $H = 0{,}7$ наведені на рис. 2 і показані лінією, яка позначена знаком «+», а розрахунки за формулою Нороса показані штриховою лінією.

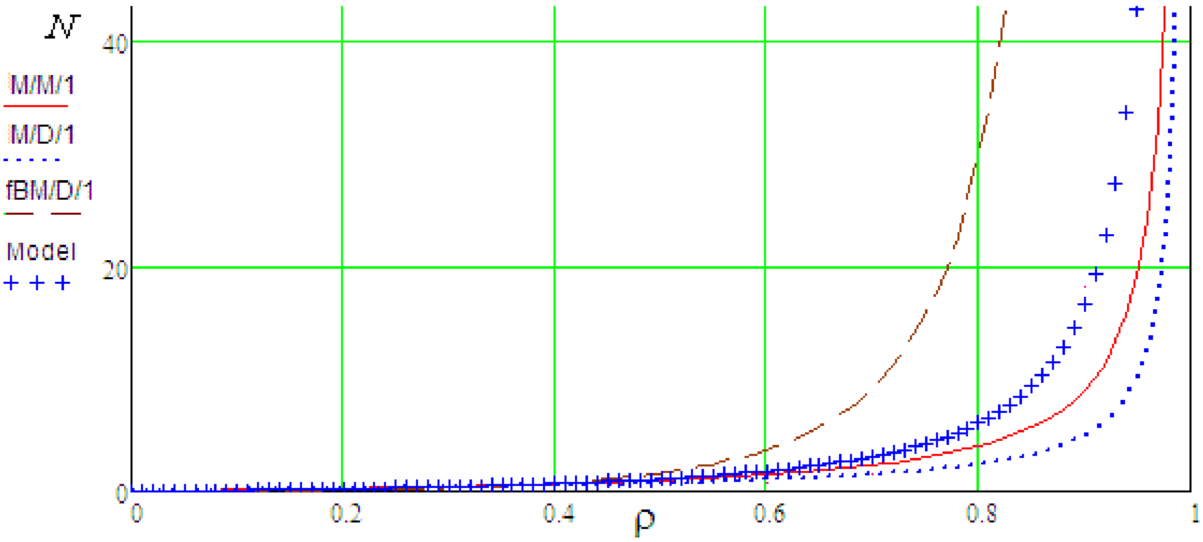

Рисунок 2 – Результат моделювання середньої кількості заявок у системі N для моделі *fBM/D/1* при $H = 0{,}7$

За допомогою розробленої моделі виконано дослідження впливу законів розподілу тривалості обслуговування на параметри якості обслуговування в умовах самоподібного трафіка. Для регулярного, експонентного та логарифмічно нормального законів розподілу тривалості обслуговування коефіцієнт Херста $H = 0{,}55$ та $H = 0{,}85$, а завантаження системи (інтенсивність навантаження) змінюється у межах ρ = 0,1…0,9. Для заданих умов розраховується ентропія розподілу станів системи (1), що подано на рис. 3.

На рис. 3 бачимо, що на ентропію розподілу станів системи (відповідно і на параметри якості обслуговування) впливає величина коефіцієнта Херста та закон розподілу тривалості обслуговування. З рисунка видно, що графіки залежності ентропії системи від її завантаження при певних значеннях параметра Херста H для самоподібного трафіка перетинаються з графіками аналогічних залежностей для відомих моделей, таких як *M/M/1*, *M/D/1* та *M/H/1*. Однак при значеннях коефіцієнта Херста в межах $H = 0{,}55…0{,}85$ за будь-якого закону розподілу тривалості обслуговування при зміні коефіцієнта варіації *var* тривалості обслуговування від 0 до 5 побудовані графіки ентропії «накривають» практично всю область можливих значень ентропії розподілів станів системи в моделях *fBM/D/1, fBM/M/1* ∞ *fBM/LogN/1*.

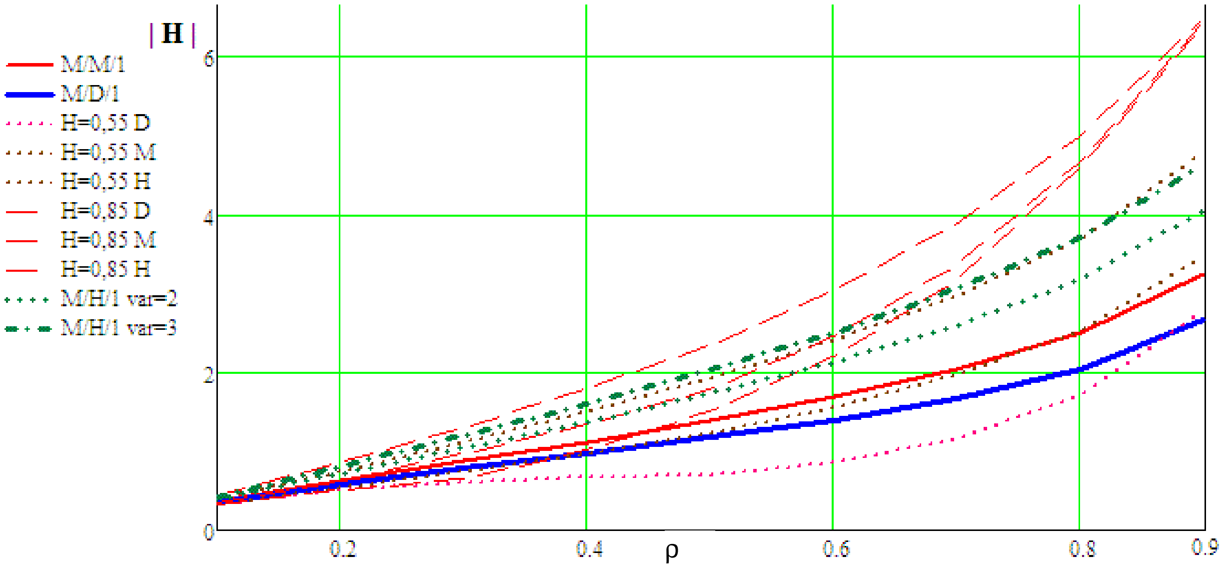

Рисунок 3 – Залежність ентропії розподілу від ρ в моделі *fBM/M/1*

Результатами моделювання встановлено, 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* середня довжина черги $Q = 0{,}982$ і середня тривалість очікування всіх заявок $W = 1{,}611$, що перевищує відповідні значення для моделі *M/M/1* 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. Ці параметри між собою знаходяться в такій залежності:

$$N = \rho + \rho^2 \frac{1 + C^2}{2(1 - \rho)}, \qquad Q = N - \rho, \qquad T = \frac{N}{\rho}, \qquad W = T - 1. \tag{4}$$

Отже для оцінки параметрів якості обслуговування самоподібного трафіка можна використовувати методи розрахунку відомих розподілів, ентропія яких найбільш близька до ентропії самоподібного трафіка. Розрахунок параметрів якості функціонування системи з самоподібним трафіком можливий за будь-якого закону розподілу тривалості обслуговування за допомогою формули Поллачека-Хінчина, справедливої для моделі *M/G/*1, оскільки в ній ураховується значення коефіцієнта варіації тривалості обслуговування. Необхідною умовою такого розрахунку є визначення ентропії розподілу станів системи.

Алгоритм застосування даного методу розрахунку параметрів якості функціонування системи такий:

1. Для встановленого закону розподілу станів системи визначається ентропія розподілу H_{fBM} (за відомими формулами).
2. Зміною коефіцієнта варіації C для моделі *M/H/1/r*=∞ досягається збіг значень ентропії $H_{M/H/1} = H_{fBM}$.
3. За допомогою знайденого коефіцієнта варіації C визначається середня кількість пакетів у системі N за формулою Поллачека-Хінчина (4).
4. Через відомі співвідношення (4) визначаються інші параметри якості функціонування системи.

У висновках можна зазначити, що за допомогою створеної імітаційної моделі одноканальної системи обслуговування самоподібного трафіка з різноманітними законами розподілу тривалості обслуговування пакетів та виконаного статистичного моделювання досліджено вплив явища самоподібності трафіка на пропускну здатність телекомунікаційної системи. Обґрунтовано, що для оцінки параметрів якості обслуговування самоподібного трафіка в одноканальній системі з накопичувальним буфером можна використовувати методи розрахунку відомих розподілів, ентропія яких збігається або найбільш близька до ентропії розподілу станів системи з самоподібним трафіком.

Література

1. *Крылов В.В.* Теория телетрафика и её приложения / В.В. Крылов, С.С. Самохвалова. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 288 с.: ил.
2. *Шнепс М.А.* Системы распределения информации. Методы расчета: справ. пособ. / Шнепс М.А. . – М.: Связь, – 1979. – 344 с.
3. *Norros Ilkka.* A storage model with self-similar input. // Queuing Systems. – 1994. – Vol. 16.
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.