

УДК 621. 391

## МЕТОД РОЗРАХУНКУ ПРОПУСКНОЇ ЗДАТНОСТІ ПАКЕТНОЇ МЕРЕЖІ ДОСТУПУ ДЛЯ ПРИСТРОЇВ ІОТ

*Ложковський А.Г., Гуляєв К.Д.*

*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,  
65029, Україна, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1.  
[aloshk@onat.edu.ua](mailto:aloshk@onat.edu.ua), [k.guliaiev@gmail.com](mailto:k.guliaiev@gmail.com)*

## МЕТОД РАСЧЕТА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ПАКЕТНОЙ СЕТИ ДОСТУПА ДЛЯ УСТРОЙСТВ ІОТ

*Ложковский А.Г., Гуляев К.Д.*

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,  
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.  
[aloshk@onat.edu.ua](mailto:aloshk@onat.edu.ua), [k.guliaiev@gmail.com](mailto:k.guliaiev@gmail.com)*

## CALCULATING METHOD OF THE PACKET NETWORK ACCESS TRAFFIC CAPACITY FOR ІОТ DEVICES

*Lozhkovskiy A.G., Guliaiev K.D.*

*O.S. Popov Odessa National Academy of Telecommunications,  
1 Kuznechna St., Odessa, 65029, Ukraine.  
[aloshk@onat.edu.ua](mailto:aloshk@onat.edu.ua), [k.guliaiev@gmail.com](mailto:k.guliaiev@gmail.com)*

**Анотація.** При створенні пакетних мереж нового покоління виникає проблема розрахунку пропускної здатності мереж широкопалосного мультисервісного доступу. На практиці для цього використовують математичне моделювання, або, без належного обґрунтування, традиційні формули теорії розподілу інформації. Відоме аналітичне рішення для технології АТМ надзвичайно громіздке і практично не застосовується. Загальноприйнятого аналітичного або інженерного методу вирішення проблеми на сьогодні немає. Разом з тим телекомунікаційні мережі мають розвиватися так, щоб забезпечувалися всі необхідні умови для практичного застосування концепції «Інтернету речей» (ІоТ). Однією з таких умов є обслуговування мультисервісного трафіка з заданими показниками якості обслуговування. У статті розроблено метод розрахунку пропускної здатності або кількості умовних каналів пакетної мережі доступу для пристроїв ІоТ. При цьому розрахунок пропускної здатності мережі доступу пристроїв ІоТ виконується на рівні викликів та пакетів окремо. На рівні викликів від пристроїв ІоТ для трафіка застосовується модель Енгсета через невеликі групи самих пристроїв, а на рівні пакетів – модель самоподібного потоку. Розрахунок характеристик якості обслуговування в пакетній мережі зв'язку зводиться до визначення коефіцієнта Херста самоподібності трафіка, після чого за відомою формулою Норроса розраховується середня кількість пакетів у системі. Інші характеристики, такі, як середня кількість пакетів у черзі, середній час перебування пакетів у системі та середній час затримки пакетів в одноканальній системі розраховуються виходячи із їх функціональних співвідношень із раніше розрахованою середньою кількістю пакетів у системі. На основі апроксимації функції розподілу станів системи розраховуються імовірність очікування обслуговування пакета і середній час затримки пакетів у черзі пакетного комутатора.

**Ключові слова:** характеристики якості обслуговування, пропускна здатність, імовірність очікування, самоподібний трафік, пристрої ІоТ, Інтернет речей.

**Аннотация.** При создании пакетных сетей нового поколения возникает проблема расчета пропускной способности сетей широкополосного мультисервисного доступа. На практике для этого используют математическое моделирование, или без надлежащего обоснования, традиционные формулы теории распределения информации. Известное аналитическое решение для технологии АТМ чрезвычайно громоздкое и практически не применяется. Общепринятого аналитического или

*Ложковський А.Г., Гуляєв К.Д.*

**Метод розрахунку пропускної здатності пакетної мережі доступу для пристроїв ІоТ**

инженерного метода решения проблемы на сегодня нет. Вместе с тем телекоммуникационные сети должны развиваться так, чтобы обеспечивались все необходимые условия для практического применения концепции «Интернета вещей» (IoT). Одним из таких условий является обслуживание мультисервисного трафика с заданными показателями качества обслуживания. В работе разработан метод расчета пропускной способности или количества условных каналов пакетной сети доступа для устройств IoT. При этом расчет пропускной способности сети доступа устройств IoT выполняется на уровне вызовов и пакетов отдельно. На уровне вызовов от устройств IoT для трафика применяется модель Энгсета из-за малочисленных групп самих устройств, а на уровне пакетов – модель самоподобного потока. Расчет характеристик качества обслуживания в пакетной сети связи сводится к определению коэффициента Херста самоподобия трафика, после чего по известной формуле Норроса рассчитывается среднее количество пакетов в системе. Другие характеристики, такие, как среднее количество пакетов в очереди, среднее время пребывания пакетов в системе и среднее время задержки пакетов в одноканальной системе рассчитываются исходя из их функциональных соотношений с ранее рассчитанным средним количеством пакетов в системе. На основе аппроксимации функции распределения состояний системы рассчитываются вероятность ожидания обслуживания пакета и среднее время задержки пакетов в очереди пакетного коммутатора.

**Ключевые слова:** характеристики качества обслуживания, пропускная способность, вероятность ожидания, самоподобный трафик, устройства IoT, Интернет вещей.

**Abstract.** When creating packet networks of a new generation, the problem of calculating the throughput of broadband multiservice access networks arises. In practice, for this they use mathematical modeling, or without proper justification, the traditional formulas of the theory of information distribution. The well-known analytical solution for ATM technology is extremely cumbersome and practically not used. Today, there is not generally accepted analytical or engineering method for solving the problem. At the same time, telecommunication networks must develop to provide all the necessary conditions for the practical application of the concept of the Internet of Things (IoT). One of these conditions is the maintenance of multiservice traffic with specified quality of service indicators. The paper developed a method for calculating the bandwidth or the number of conditional channels of a packet access network for IoT devices. In this case, the calculation of the bandwidth of the access network of IoT devices is performed at the level of calls and packets separately. At the level of calls from IoT devices, the Engset model is used for traffic due to the small number of groups of the devices themselves, and at the packet level, the model of self-similar flow is applied. Calculation of quality of service characteristics in a packet communication network is reduced to determining the Hurst coefficient of self-similarity of traffic, after which the average number of packets in the system is calculated using the well-known Norros formula. Other characteristics, such as the average number of packets in the queue, the average residence time of packets in the system and the average delay time of packets in a single-channel system, are calculated based on their functional relationship with the previously calculated average number of packets in the system. Based on the approximation of the distribution function of the system states, the probability of waiting for packet servicing and the average delay time of packets in the packet switch queue are calculated.

**Key words:** QoS characteristics, bandwidth, latency, self-similar traffic, IoT devices, Internet of Things.

Телекомунікаційні мережі розвиваються так, щоб забезпечувалися всі необхідні умови для практичного застосування концепції «Інтернету речей» (IoT). Однією з таких умов є обслуговування мультисервісного трафіка з заданими показниками якості обслуговування. Цей трафік можна розглядати як результат складання двох компонентів, які є потоками IP-пакетів різної природи. Перший компонент іноді називають трафіком людей (користувачем, як правило, стає людина), другий – це трафік речей, створюваний при реалізації концепції IoT [1]. Властивості першого компонента активно вивчаються фахівцями з теорії телетрафіка на підставі теоретичних моделей і результатів вимірювань в експлуатованих мультисервісних мережах. Дослідження другого компонента ускладнюються тим, що поки складно прогнозувати характер зростання трафіка пристроїв IoT з необхідною достовірністю [2], особливо мультисервісного трафіка, до складу якого входять повідомлення, що створюються кінцевими пристроями IoT.

«Інтернет речей» є мережею різноманітних підключень пристроїв до телекомунікаційної мережі, що реалізують різні моделі взаємодії, зокрема: Thing-Thing; Thing-User; Thing-Web Object. Ці підключення все частіше здійснюється за допомогою

бездротових технологій – 3G, 4G, Wi-Fi, WiMAX [3]. Різноманітність IoT (домашні прилади, посуд, транспорт, обладнання медицини, енергетики, промисловості тощо) створює різноманітний за інтенсивністю, чутливістю до затримки й втрат трафік. З інфокомунікаційної точки зору «Інтернет речей» надають у вигляді символічної формули: IoT = «датчики + дані + мережі + послуги» [4].

Застосування технології «Інтернету речей» породжує розмаїтість видів передаваного трафіка даних, який створюється різними мережами. Різноманітний трафік для створення адекватної моделі вимагає використання найбільш підходящого математичного апарату. Одні моделі трафіка більш коректно описуються на основі розподілів ймовірностей, інші – на основі методів фрактального аналізу. Моделі потоку заявок апроксимуються різними розподілами як з «легкими хвостами» (розподіл Гаусса, Пуассона), так і з «довгими хвостами» (розподіли Парето, Вейбулла, логнормальний розподіл). Для опису трафіка в мережах з пакетною комутацією знаходять широке застосування самоподібні моделі трафіка. Ступінь самоподібності трафіка або показник Херста  $H$  можуть бути визначені різними методами. Є сім основних методів оцінки показника Херста  $H$ , кожен з яких заснований на тій чи іншій властивості самоподібного процесу:

- метод оцінки  $H$  на основі R/S-аналізу Херста;
- метод оцінки  $H$  на основі залежності дисперсії від рівня агрегації ряду самоподібного процесу (метод варіограми);
- метод оцінки  $H$  на основі залежності величини очікуваних модулів відхилень від рівня агрегації ряду самоподібного процесу;
- метод оцінки  $H$  на основі дисперсії детрендованих залишків;
- метод оцінки  $H$  на основі періодограми;
- метод оцінки  $H$  на основі апроксимації Уїттла періодограми;
- метод оцінки  $H$  на основі вейвлет-аналізу.

До переваг методу R/S-аналізу Херста можна віднести стійкість оцінки щодо форми розподілу, в тому числі несиметричних розподілів і розподілів з довгими хвостами. Тому для випадку пакетного трафіку, де інтервал часу між пакетами має розподіл з «довгим хвостом» Парето або Вейбулла використовуємо метод R/S-аналізу Херста. Метод Херста дозволяє виявити у статистичних даних пакетного трафіка такі його властивості: тенденцію слідувати у напрямку тренда (персистентність) і швидко змінюваність послідовних значень інтенсивності трафіка (сплески інтенсивності, що призводять до пачкування), післядію, сильну пам'ять, фрактальність (самоподібність), наявність періодичних і неперіодичних циклів (через особливості застосованих протоколів передачі). Проте, перелічені методи розрахунку показника Херста є досить трудомісткими, що ускладнює їх використання в умовах реального процесорного часу оброблення параметрів трафіка при виявленні його самоподібних властивостей. Тому у [5] надано спрощений метод визначення показника Херста методом R/S-аналізу, який забезпечує точність розрахунку не гірше 1–2%.

Однією з важливіших властивостей трафіка мереж з комутацією пакетів є його самоподібність, тобто збереження своєї структури за різного масштабу часу. Традиційні методи розрахунку і моделювання, які засновані на пуассонівських моделях, припускають, що всі пакети, які надійшли в досліджувану систему, взаємно незалежні, а інтервали часу між приходом двох наступних пакетів розподілені за експонентним законом. Але самоподібний трафік має повільно спадну автокореляційну функцію, де ймовірності інтервалу часу між моментами приходу двох послідовних пакетів розподілені за законами Парето або Вейбулла [5]. Через такі властивості самоподібного трафіка традиційні методи розрахунку дають занадто оптимістичні рішення і призводять до недооцінки реальної пропускної здатності мережі.

**Метою статті** є розробка методу розрахунку пропускної здатності або кількості умовних каналів пакетної мережі доступу для пристроїв IoT («Інтернет речей»).

У моделях потоку пакетів кожен ІР-пакет розглядається як заявка (транзакт), яка повинна бути обслужена – передана, прийнята або оброблена. Трафік, створюваний ІР-пакетами, характеризується такими параметрами, як: інтенсивність надходження пакетів (пакетів/с), середня довжина пакета (біт, байт), інтервал часу між пакетами, інтенсивність трафіка (біт/с), частка втрачених пакетів, частка пакетів з помилками. З функціональних залежностей особливий інтерес являють функції розподілу інтервалів часу між пакетами та довжини пакетів і характер загасання цієї функції. Самоподібність знайдено в трафіку різних рівнів моделі OSI – транспортного (TCP/UDP/SCTP), прикладного (FTP, Telnet, HTTP).

Існує два основні підходи до дослідження трафіка ІР-комунікацій:

- на рівні викликів;
- на рівні пакетів.

При використанні першого підходу весь трафік розглядається як потік окремих викликів, що надходять на досліджувану систему. Актуальним є завдання визначення того, наскільки трафік ІР-комунікацій відрізняється від трафіка традиційної телефонії і наскільки ці відмінності (якщо такі є) змінюють основні параметри, що застосовуються при розрахунку і проектуванні мереж ІР-комунікацій. Другий підхід ґрунтується на тому факті, що технологія ІР-комунікацій базується на принципах пакетної комутації.

Дослідження трафіка на рівні викликів зводиться до визначення двох його основних характеристик:

- імовірнісного закону розподілу інтенсивності викликів, що надходять на досліджувану систему;
- імовірнісного закону розподілу тривалості цих викликів.

Для спрощення дослідження трафіка ІР-комунікація на рівні пакетів проводять з урахуванням його декомпозиції на дві основні складові:

- трафік сигнальних повідомлень для встановлення, зміни і руйнування сеансу зв'язку (сигналізація);
- медіатрафік (голос, відео).

Кожен із цих типів трафіка використовує свої протоколи передачі, може передаватися за різними маршрутами, має різну структуру і має різні вимоги до якості обслуговування QoS (Quality of Service), таких, як затримка, джиттер і втрати пакетів.

**Розрахунок пропускної здатності мережі доступу IoT на рівні викликів.** Типова структура автономного кластера мережі доступу пристроїв IoT, яку показано на рис. 1, передбачає каскадне підключення вузлів доступу (ВД) і, в деяких випадках, можливість взаємного зв'язку пристроїв IoT кластера. Вона містить транзитний вузол доступу ВД<sub>1</sub> і каскадно підключені через нього ВД<sub>2</sub> ... ВД<sub>м</sub>. Вузлами доступу, в залежності від конкретної технології, можуть бути мультиплектори ліній xDSL (DSLAM), базові станції WiMAX і/або Wi-Fi та інше обладнання.

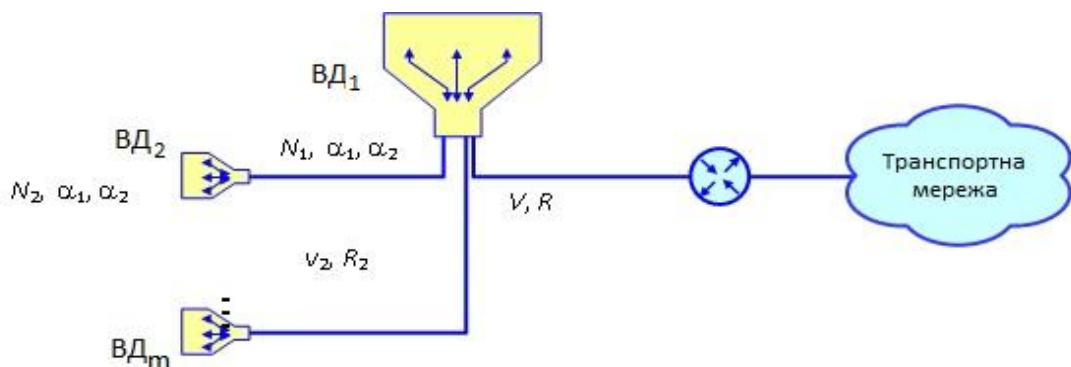


Рисунок 1 – Мережа доступу пристроїв IoT з каскадним підключенням вузлів

При розрахунку пропускної здатності мережі доступу зазвичай вважають, що на кожен ВД надходить пуассонівський потік викликів, а стани послідовних ВД незалежні [5]. На практиці такий підхід може бути виправданий внаслідок простоти і зазвичай прийнятною, хоча й невідомою похибкою. Однак обидві ці передумови невірні: потоки викликів внаслідок кінцевого числа джерел треба описувати моделлю примітивного потоку (модель Енгсета), а стани послідовно з'єднаних ВД залежні, тому що кожен виклик займає в них певну пропускну здатність, і до того ж через втрати змінюється характер навантаження, що надходить на транзитний ВД (як би зрізаються піки навантаження і тому зменшується її дисперсія). Таким чином, зазначені причини призводять до зниження пропускної здатності.

Потоки викликів внаслідок кінцевої кількості джерел описуються моделлю примітивного потоку (пуассонівського потоку другого роду). За примітивного потоку розподіл інтервалів між викликами теж експонентний, але його параметр  $\lambda$  не постійний, а пропорційний до кількості вільних джерел навантаження, тобто пристроїв IoT.

Для отримання точних результатів треба розраховувати кожен автономний сегмент мережі доступу з каскадним включенням ВД (кластер) в цілому, не поділяючи його на окремі ВД, що пов'язано з певними обчислювальними труднощами.

Позначимо:

$N_1, N_2 \dots N_m$  – ємності відповідних вузлів доступу;

$R_1 \dots R_m$  – швидкості передавання, які необхідно забезпечити для ВД<sub>1</sub>... ВД<sub>m</sub>;

$R$  – загальна швидкість передавання, яка необхідна в напрямку до транспортної мережі від усіх вузлів доступу розглянутого кластера;

$v_1 \dots v_m$  – розрахункова кількість умовних каналів для ВД<sub>1</sub>...ВД<sub>m</sub> відповідно;

$V$  – розрахункова загальна кількість умовних каналів для напрямку до транспортної мережі;

$\alpha_1, \alpha_2$  – інтенсивність одного джерела навантаження (абонента, пристрою IoT) у вільному стані відповідно усередині кластера та до транспортної мережі.

Треба визначити кількість умовних каналів так, щоб не перевищувалися нормативні втрати викликів, а потім визначити для кожного такого каналу швидкість передавання так, щоб не перевищувалися норми втрат пакетів, тоді визначимо необхідну смугу пропускання в Мбіт/с кожного напрямку зв'язку. Тут під умовним каналом розуміється частина загальної смуги пропускання, еквівалентна за пропускну здатністю вхідному (абонентському) порту.

Виклики обслуговуються з явними втратами, час обслуговування кожного виклику є експонентним, а потік викликів від кожної групи пристроїв IoT є примітивним, тобто має властивості ординарності, стаціонарності та простої післядії. При цьому стани системи розподілені за законом Енгсета, який ще називається розподілом Ерланга-Бернуллі або усіченим розподілом Бернуллі. Така модель характерна для невеликих груп абонентів або IoT пристроїв (до 300).

Позначимо  $P(k_1, l_1; \dots; k_m, l_m)$  – імовірність наявності на ВД<sub>1</sub>...ВД<sub>m</sub> відповідно  $k_1 \dots k_m$  з'єднань усередині кластера й  $l_1 \dots l_m$  з'єднань до транспортної мережі. Виходячи з формули Енгсета (3.3) для конкретного  $i$ -го ВД імовірність наявності  $k_i + l_i$  з'єднань дорівнює:

$$C_{N_i}^{l_i} \alpha_2^{l_i} C_{N_i - l_i}^{k_i} \alpha_1^{k_i} p_0, \quad (1)$$

де  $p_0$  – імовірність відсутності з'єднань. Тоді для сталого режиму маємо:

$$P(k_1, l_1; \dots; k_m, l_m) = \frac{1}{C} \prod_{i=1}^m C_{N_i}^{l_i} \alpha_2^{l_i} C_{N_i - l_i}^{k_i} \alpha_1^{k_i}, \quad (2)$$

де константа  $C$  визначається з умови, що нормує,  $\sum P(k_1, l_1; \dots; k_m, l_m) = 1$ , а сума включає всі стани, для яких виконується:  $0 \leq k_i + l_i \leq v_i$ ,  $\sum_{i=1}^m l_i \leq V$ .

Розрахунки за формулою (2) громіздкі. Їх можна спростити, якщо припустити симетричність кластера мережі доступу, тобто задати  $N_i = N$ ,  $v_i = v$  для всіх значень  $i$  ( $0 \leq i \leq m$ ). Спрощення досягається за рахунок появи множин станів кластера, у кожній з яких всі стани однаково ймовірні [6].

З урахуванням спрощень, які надано для подібної задачі у [6], послідовно розраховуються характеристики якості обслуговування абонентів (пристроїв IoT) у схемі рис. 1. Позначимо:

- $P_i$  – імовірність зайнятості  $i$  умовних каналів для розглянутого ВД при зв'язку всередині кластера;
- $\Pi_j$  – 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.

Можна показати, що мають місце співвідношення [6]:

$$P_i = \frac{\sum_{l=0}^i C_N^l \alpha_2^l C_{N-l}^{i-l} \alpha_1^{i-l} \sum_{j=0}^{V-l} B_j(m-1)}{\sum_{x=0}^V B_x(m)}, \quad \Pi_j = \frac{B_j(m)}{\sum_{x=0}^V B_x(m)}, \quad (3)$$

$$P_{ij} = \frac{\sum_{l=0}^i C_N^l \alpha_2^l C_{N-l}^{i-l} \alpha_1^{i-l} B_{j-l}(m-1)}{\sum_{x=0}^V B_x(m)}.$$

Звідси визначаються втрати за часом  $P_t$  – імовірності зайнятості всіх доступних умовних каналів. Для зв'язку всередині кластера  $P_t = P_v$ . Для зв'язку в напрямку транспортної мережі величина втрат за часом визначається сумою двох імовірностей – імовірності  $P_v$  і імовірності зайнятості  $V$  умовних каналів за умови, що для розглянутого ВД є хоча б один вільний умовний канал зв'язку із транзитним ВД, тобто  $P_t = P_v + \sum_{i=0}^{v-1} P_{iV} = P_v + \dot{I}_V - P_{vV}$ .

Однак реально важливі втрати не за часом, а за викликами, обумовлені відношенням інтенсивностей потоків втрачених і вхідних викликів. Для конкретного ВД інтенсивність потоків викликів всередині кластера  $\lambda_k$  та зовнішнього вхідного  $\lambda_e$  відповідно дорівнюють:

$$\lambda_k = \sum_{i=0}^v \alpha_1 (N-i) P_i, \quad \lambda_e = \sum_{i=0}^v \alpha_2 (N-i) P_i. \quad (4)$$

Інтенсивності втрачених викликів становлять:

- для потоку всередині кластера –  $\alpha_1 (N-v) P_v$ ;
- для зовнішнього потоку на ділянці до транзитного вузла –  $\alpha_2 (N-v) P_v$ ;
- на ділянці до транспортної мережі –  $\sum_{i=0}^{v-1} \alpha_2 (N-i) P_{iV}$ .

Тоді втрати викликів  $P_B$  для зв'язку всередині кластера і для зовнішнього зв'язку становлять відповідно:

$$P_{Bк} = \frac{\alpha_1(N-v)P_v}{\lambda_k}, \quad P_{Bв} = \frac{\alpha_2(N-v)P_v + \sum_{i=0}^{v-1} \alpha_2(N-i)P_{iV}}{\lambda_k}. \quad (5)$$

Для будь-якого ВД інтенсивності обслуженого навантаження при зв'язку всередині кластера та зовнішнього відповідно дорівнюють:

$$Y_k = \sum_{i=0}^v iP_i, \quad Y_g = \sum_{j=0}^V jP_j. \quad (6)$$

Таким чином можна розрахувати втрати викликів і відповідну їм пропускну здатність (Ерл) мережі мультисервісного абонентського доступу. Рекурентний метод розрахунку кількості умовних каналів дозволяє оцінити похибку наближених методів розрахунку, оскільки дає точні результати в окремому випадку симетричності мережі доступу, тобто за однакових ємностей вузлів доступу й однакових параметрів абонентського навантаження кожного вузла.

**Розрахунок пропускну здатності мережі доступу IoT на рівні пакетів.** Розрахунок показників якості обслуговування (QoS) в одноканальній системі з нескінченною чергою за самоподібного трафіка зводиться до визначення показника Херста або коефіцієнта самоподібності трафіка, після чого за відомою формулою Норрса розраховується середня кількість пакетів у системі  $N$  [5]. Інші характеристики, такі, як середня кількість пакетів у черзі  $Q$ , середній час перебування пакетів у системі  $T$  і середній час затримки пакетів у системі  $W$  потім розраховуються виходячи з їх відомих функціональних співвідношень з розрахованим середнім значенням  $N$  [5].

**Одноканальна система з необмеженою кількістю місць очікування (рис. 2) обслуговує пакетний трафік з самоподібними властивостями. Тривалість обслуговування пакетів має довільний закон розподілу з математичним сподіванням  $\bar{x}$ . Завантаженість системи (інтенсивність, *utilization factor*) дорівнює  $\rho$ . Визначити основні характеристики *QoS*.**

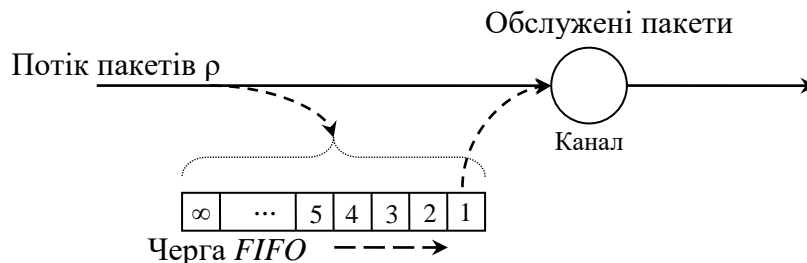


Рисунок 2 – Модель одноканальної системи з чергою

Для оцінки характеристик якості обслуговування в одноканальній системі з самоподібним трафіком, який являє собою фрактальний броунівський процес, необхідно знати його ймовірнісно-часові параметри або функцію розподілу інтервалу часу між пакетами. Однак відповідно до методу Норрса можна виконати цей розрахунок на основі показника самоподібності Херста. Якщо ймовірнісною функцією розподілу інтервалу часу між пакетами є функція Парето ( $Pa$ ) або Вейбулла ( $Wb$ ), то потрібно розрахувати через параметр форми  $a$  обраного розподілу показник Херста (коефіцієнт самоподібності  $H$ ). Цей розрахунок слід виконувати не за відомими формулами лінійної залежності  $H$  від  $a$  [5], а за уточненими в роботах [7, 8] формулами апроксимації такої залежності.

У [7] показано, а у даній роботі уточнено, що для трафіка з розподілом інтервалу часу між пакетами за законом Парето показник Херста розраховується за формулою:

$$H_{Pa} = a^{-0,25a - 1.25}, \quad (7)$$

де  $a = 1 \dots 2$  – параметр форми розподілу Парето.

У [8] показано, а у даній роботі уточнено, що для трафіка з розподілом інтервалу часу між пакетами за законом Вейбулла показник Херста розраховується за формулою:

$$H_{Wb} = \frac{3 \left( 40e^{-9a} + 17 \right)}{100}, \quad (8)$$

де  $a = 0 \dots 1$  – параметр форми розподілу Вейбулла.

При цьому нема потреби розраховувати для даного трафіка показник Херста або коефіцієнт самоподібності достатньо складним способом, наприклад, методом абсолютних моментів (найменших квадратів) або методом  $R/S$ -статистики.

Після визначення показника Херста необхідно за формулою Норроса [9] розрахувати верхню межу можливого середнього значення кількості пакетів у системі  $N$ :

$$N = \frac{\frac{0,5}{\rho^{1-H}}}{(1-\rho)^{1-H}}. \quad (9)$$

У роботі [10] розроблено метод і надані результати розрахунку через відомі співвідношення [5] основних характеристик якості обслуговування:

– середня кількість пакетів у черзі  $Q$

$$Q = N - \rho \quad (10)$$

– середній час перебування пакетів у системі  $T$

$$T = N / \rho \quad (11)$$

– середній час затримки пакетів у системі  $W$

$$W = T - 1 \quad (12)$$

де  $T$  і  $W$  дано в умовних одиницях середньої тривалості обслуговування.

Застосовуючи реальні функціональні залежності показника Херста  $H$  від параметра  $a$  форми розподілу Парето (7) або Вейбулла (8), можна підвищити точність розрахунку характеристик якості обслуговування на порядок порівняно з використанням лінійної залежності показника  $H$  від параметра форми розподілу  $a$  [5].

У роботі [11] розроблено метод розрахунку імовірності обслуговування пакета  $P_w$  із імовірнісної функції розподілу станів одноканальної системи за самоподібного трафіка:

$$P_w = 1 - \frac{A_1}{\sum_{i=0}^{\infty} A_i}, \quad (13)$$

де  $A_i$  – функція розподілу станів одноканальної системи з нескінченною чергою.

При цьому можна розрахувати й середній час затримки пакетів у черзі системи (наприклад, у черзі пакетного комутатора) за формулою:

$$t_q = \frac{W}{P_w}. \quad (14)$$

У висновках можна зазначити, що при дослідженні мультисервісного трафіка слід враховувати можливу зміну його характеру в міру збільшення кількості кінцевих пристроїв IoT, за допомогою яких реалізується концепція «Інтернет речей». У найближчі роки обсяг додаткових IP-пакетів, що відносяться до трафіка «Інтернету речей», буде не таким істотним.



З іншого боку, необхідно розглядати також і сценарії розвитку «Інтернету речей», які передбачають значне зростання відповідного трафіка в доступній для огляду перспективі [12].

ЛІТЕРАТУРА:

1. Зайцев В. Особенности мультисервисного трафика с учетом сообщений, создаваемых устройствами IoT / В. Зайцев Н. Соколов // Первая миля. – 2017. – № 4. – С. 44–47.
2. Соколов Н.А. Сценарии реализации концепции "Интернет вещей" / Н.А Соколов // Первая миля. – 2016. - № 4. - С. 50–54.
3. Шахнович И.В. Современные технологии беспроводной связи. Издание второе, исправленное и дополненное / И.В. Шахнович. – М.: Техносфера, 2006. – 288 с.
4. Борейко О.Ю. Проектування Інтернет речей (IoT) [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://www.slideshare.net/ssuserf405bc/iot-79608563>
5. Ложковський А.Г. Нові методи теорії телетрафіка / Ложковський А.Г. – Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2018. – 80 с.
6. 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.
7. Ложковский А.Г. Расчет характеристик QoS для трафика с распределением Парето / А.Г. Ложковский, К.Д. Гуляев // Міжнародна НТК «Сучасні інформаційно-телекомунікаційні технології». – Державний університет телекомунікацій, (Київ, 17-20 листопада) . - 2015. – С. 35-36.
8. Ложковский А.Г. Расчет характеристик самоподобного трафика, аппроксимируемого распределением Вейбулла / А.Г. Ложковский, К.Д. Гуляев // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – Хмельницький національний університет. – 2015. – № 2(51). – С. 202-205
9. Norros Ilkka. A storage model with self-similar input. – *Queueing Systems*, 1994. – Vol. 16.
10. Ложковский А.Г. Расчет всех характеристик QoS в одноканальной системе при обслуживании самоподобного трафика / А.Г. Ложковский, К.Д. Гуляев // 70-та НТК професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів. – ОНАЗ ім. О.С. Попова, (Одеса, 2–3 грудня) .- 2015.
11. Ложковский А.Г. Расчет вероятности ожидания обслуживания в одноканальной системе с самоподобным трафиком / А.Г. Ложковский, К.Д. Гуляев // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова. – 2015. – № 2. – С.31-35.
12. Wang Q., Zhang T. Source traffic modeling in wireless sensor networks for target tracking // In Proc. of the 5th ACM International Symposium on Performance Evaluation of Wireless Ad-Hoc, Sensor, and Ubiquitous Networks (PE-WASUN'08). 2008. P. 96–100.

REFERENCES:

1. Zajcev V. Osobennosti multiservysnogo trafyka s uchetom soobshhenij, sozdavaemix ustrojstvamy IoT / V. Zajcev N. Sokolov // Pervaya mylya. – 2017. – № 4. – S. 44–47.
2. Sokolov N.A. Scenariy realizacyy koncepcyy "Internet veshhej" / N.A Sokolov // Pervaya mylya. – 2016. – № 4. – S. 50–54.
3. Shaxnovych Y.V. Sovremennye texnologyy besprovodnoj svyazy. Izdanye vtoroe, ispravlennoe i dopolnennoe / Y.V. Shaxnovych. – M.: Texnosfera, 2006. – 288 s.
4. Borejko O.Yu. Proektuvannya Internet rechej (IoT) [Elektronnyj resurs] / Rezhym dostupu: <https://www.slideshare.net/ssuserf405bc/iot-79608563>
5. Lozhkovskiy A.G. Novi metody teoriiy teletrafika / A.G. Lozhkovskiy. – Odesa: ONAZ im. O.S. Popova, 2018. – 80 s.
6. Lozhkovskiy A.G. Rekurrentnyi metod rascheta propusknoj sposobnosti paketnoj sety dostupa / A.G. Lozhkovskiy, N.S. Salmanov, N.A. Chumak // Naukovi praci ONAZ im. O.S. Popova. – 2006. – № 2. – S. 44-48.
7. Lozhkovskiy A.G. Raschet xarakterystyk QoS dlya trafyka s raspredelenyem Pareto / A.G. Lozhkovskiy, K.D. Gulyaev // Mizhnarodna NTK «Suchasni informacijno-telekomunikacijni tehnologiyi». – Derzhavnyi universytet telekomunikacij, (Kyuyiv, 17-20 lystopada).– 2015.
8. Lozhkovskiy A.G. Raschet xarakterystyk samopodobnogo trafyka, approksymyruemogo raspredelenyem Vejbullla / A.G. Lozhkovskiy, K.D. Gulyaev // Vymiryuvalna ta obchyslyuvalna texnika v tehnologichnyx procesax. – Xmelnyczkyi nacionalnyi universytet. – 2015. – № 2(51). – S. 202-205.
9. Norros Ilkka. A storage model with self-similar input. – *Queueing Systems*, 1994. – Vol. 16.

10. Lozhkovsky`j A.G. Raschet vsex xarakterystyk QoS v odnokanalnoi systeme pry obsluzhyvani samopodobnogo trafyka / A.G. Lozhkovskiy, K.D. Gulyaev // 70-та NTK profesorsko-vykladaczskogo skladu, naukovciv, aspirantiv ta studentiv. – ONAZ im. O.S. Popova, (Odesa, 2–3 grudnya) 2015.

11. Lozhkovsky`j A.G. Raschet veroyatnocy ozhydannya obsluzhyvaniya v odnokanalnoj systeme s samopodobnym trafikom / A.G. Lozhkovskiy, K.D. Gulyaev // Naukovi praci ONAZ im. O.S. Popova. – 2015. – № 2. – С.31-35.

12. Wang Q., Zhang T. Source traffic modeling in wireless sensor networks for target tracking // In Proc. of the 5th ACM International Symposium on Performance Evaluation of Wireless Ad-Hoc, Sensor, and Ubiquitous Networks (PE-WASUN'08). 2008. P. 96–100.

DOI 10.33243/2518-7139-2020-1-2-31-40