

ОЦЕНИВАНИЕ РАЗМЕРА БУФЕРОВ СЕТЕВЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ ТРАФИКА В ВИДЕ ON/OFF ПРОЦЕССА

У роботі розглянуто методи оцінювання середньої довжини черги в буфері мережного устаткування. Основна увага приділена математичній моделі фрактального трафіку у вигляді On/Off процесів, виконано аналіз придатності такої моделі для описання трафіку мережі Ethernet. Запропоновано новий метод оцінювання середньої довжини черги у буфері телекомунікаційного обладнання, необхідної для обслуговування трафіку з заданими характеристиками.

The methods to estimate the average queue length in buffers of network devices are considered in the present paper. The main focus is concentrated on the On/Off model of the Ethernet traffic. The analysis of the applicability of such a model to describe the Ethernet traffic correctly has been done. A new method for estimating the average queue length in buffers of network devices that is necessary to serve traffic in accordance with the specified characteristics is offered.

1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования характеристик трафика современных сетей с пакетной коммутацией показали, что этот трафик имеет фрактальную природу [1]. Поэтому методы моделирования и расчета сетевых параметров, основанные на использовании пуассоновских потоков, не позволяют адекватно описать процессы, происходящие в сетях с пакетной коммутацией. Таким образом, для обеспечения требуемого качества обслуживания соответствующее телекоммуникационное оборудование должно создаваться с учетом фрактальных свойств конкретного трафика. Для описания и моделирования фрактального трафика были предложены различные модели: на основе процессов авторегрессии дробно-проинтегрированного скользящего среднего (ARFIMA) [2–4], на основе фрактального броуновского движения, On/Off модели [5–7] и другие. Важно отметить, что каждая из указанных моделей наилучшим образом описывает только определенные виды фрактального трафика.

Целью данной работы является оценивание параметров On/Off модели для:

- 1) описания Ethernet-трафика от ограниченного числа источников;

²⁰ Харьковський національний університет радіоелектроніки

2) обоснования выбора размера буферов сетевых устройств, необходимого для обслуживания трафика с заданными характеристиками.

2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРАФИКА ETHERNET В ВИДЕ ON/OFF ПРОЦЕССА

On/Off процессом называется процесс, имеющий два возможных состояния: On-интервалы, соответствующие промежуткам времени, в течение которых источник генерирует трафик фиксированного уровня, и Off интервалы, отвечающие промежуткам времени, в течение которых трафик не генерируется. Обычно On/Off модели используют для описания трафика, генерируемого одним источником [5, 7]. Общесетевой трафик может быть получен как суперпозиция трафика от нескольких источников.

Пусть X_j и Y_j – независимо распределённые случайные величины, определяющие длины j -го On и Off интервалов соответственно. Для того чтобы сгенерированный с помощью On/Off модели случайный процесс был самоподобным, по крайней мере одно из распределений интервалов (On или Off) должно обладать тяжелым хвостом [7]. Одним из таких распределений является распределение Парето, функция надежности которого имеет вид:

$$R(t) = P(X > t) = \begin{cases} \left(\frac{\tau}{t}\right)^\alpha, & t \geq \tau, \tau > 0, \alpha > 0. \\ 0, & t < \tau, \end{cases} \quad (1)$$

Степень самоподобия процесса обычно оценивают параметром Хёрста H . У самоподобных процессов $0,5 < H < 1$ [1,5].

Для эмпирического оценивания параметра Хёрста самоподобных процессов существует ряд методов: оценивание по зависимости дисперсии агрегированного процесса от параметра агрегирования, R/S-анализ, оценивание по периодограмме (метод Уиттла). Первые два метода относятся к визуальным методам и не дают точной оценки параметра Хёрста, т.е. могут быть использованы только для определения того, обладает ли процесс свойствами самоподобия или он попадает в разряд традиционных моделей с краткосрочной зависимостью [1].

Параметр Хёрста On/Off процесса, у которого длины On и Off интервалов подчиняются распределению Парето, определяется выражением [8]:

$$H = \frac{3 - \min(\alpha_0, \alpha_1)}{2}, \quad (2)$$

где $\alpha_0, \alpha_1 \in (1, 2)$ параметры формы распределений длин Off и On интервалов соответственно. Заметим, что одного параметра Хёрста

не достаточно для полного описания поведения самоподобного On/Off процесса [6]. Для более точного описания On/Off процесса с паретовскими распределениями On и Off интервалов в работе предлагается использовать набор параметров $\{\alpha_0, \tau_0, \alpha_1, \tau_1\}$, где α_0, τ_0 – параметры распределения Парето (1) длин Off интервалов, а α_1, τ_1 – параметры распределения On интервалов.

3. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Предположим, что трафик локальной сети Ethernet подаётся на вход сетевого устройства, структурная схема которого изображена на рис. 1. В устройстве используется дисциплина очереди FIFO.

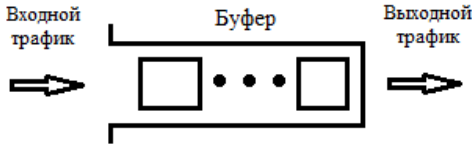


Рис. 1. Структурная схема сетевого устройства.

Входной трафик описывается On/Off процессом, в котором длины On и Off интервалов подчиняются распределению Парето.

Пусть задана реализация трафика, которая представлена эквидистантной последовательностью $x_i, i = \overline{1, N}$. Каждое значение последовательности x_i равно числу бит, полученных за интервал времени $[(i-1)\Delta, i\Delta)$.

Требуется:

1. Оценить параметры On/Off модели, описывающей трафик. В качестве критерия оптимальности оценок параметров модели используем минимум суммарного отклонения от эталона $\bar{q}^*(\rho)$ зависимости средней длины очереди $\bar{q}(\rho)$ в буфере от коэффициента использования выходного канала ρ вида

$$s(\bar{q}_i, \bar{q}^*) = \sum_{k=1}^M [\bar{q}_i(\rho_k) - \bar{q}^*(\rho_k)]^2. \quad (3)$$

Эталонная зависимость $\bar{q}^*(\rho)$ задана в точках $\rho_k, k = \overline{1, M}$. Каждое значение $\bar{q}^*(\rho_k)$ представляет собой среднюю длину очереди в буфере, возникающую при обслуживании трафика $x_i, i = \overline{1, N}$.

2. С использованием модели On/Off выбрать размер Q буфера сетевого устройства так, чтобы вероятность потери пакета не превышала величины ε при коэффициенте использования выходного канала ρ .

3. МЕТОДЫ ОЦЕНИВАНИЯ СРЕДНЕЙ ДЛИНЫ БУФЕРА

Для оценивания средней длины буферов сетевых устройств могут применяться различные подходы, а именно [1]: выполнение простых прогностических расчетов на основе экстраполяции данных, полученных на реально работающем оборудовании; разработка аналитической модели на основе теории очередей; создание и прогон программной модели. Первый метод позволяет получить простую приближенную оценку. Недостаток такого подхода состоит в том, что поведение большинства систем при изменении нагрузки не соответствует полученным оценкам. Второй метод заключается в использовании аналитической модели, представляющей собой набор уравнений, которые могут быть решены для получения требуемых параметров, в частности средней длины очереди в буфере сетевых устройств. Недостаток применения аналитической модели заключается в том, что для составления уравнений приходится принимать ряд упрощающих допущений, которые приводят к занижению, по сравнению с реальными значениями, оценок средней длины очередей в буферах сетевых устройств. Третий метод представляет собой численное моделирование. В данном случае с помощью специализированного языка программирования аналитик может подробно смоделировать реальную систему, не прибегая к многочисленным допущениям.

В [9] предложена формула, описывающая аналитическую зависимость требуемого размера буфера q от среднего коэффициента использования ρ выходного канала:

$$q = \frac{\rho^{1/(2-2H)}}{(1-\rho)^{H/(1-H)}}, \quad (4)$$

где H – параметр Хёрста случайного процесса, описывающего трафик. Зависимость (4) получена при допущениях, что входная нагрузка описывается процессом дробного броуновского движения, буфер имеет бесконечную длину, время обслуживания пакетов постоянно.

В зависимости от параметра агрегирования Δ характеристики процесса, описывающего трафик сильно отличаются. Так в [10] было показано, что трафик, сгенерированный с помощью ARFIMA модели с белым гауссовским шумом в качестве порождающего процесса, может быть использован для описания трафика со значениями параметра агрегирования Δ значительно превышающими время на передачу пакета максимальной длины. Для получения более точных значений средней длины буфера необходимо использовать трафик с периодом агрегирования Δ сравнимым со временем передачи пакета максимальной

длины. Как показано в [6], перспективным подходом для моделирования такого трафика является использование On/Off процессов.

В данной работе используем метод, состоящий из следующих процедур: оценивания параметров On/Off процесса, описывающего реальный трафик; проверки адекватности On/Off модели трафика согласно критерию (3); моделирования работы сетевого устройства и определения размера буфера сетевого устройства с использованием статистики его заполнения.

4. ОЦЕНИВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ON/OFF МОДЕЛИ

Использование критерия минимума выражения (3) для оценивания параметров $\{\alpha_0, \tau_0, \alpha_1, \tau_1\}$ On/Off модели, описывающей фрагмент реального трафика, вычислительно трудоёмко. Поэтому вначале оценим эти параметры по реализациям трафика $x_i, i = \overline{1, N}$. По агрегированному трафику построим эмпирические функции распределения $\hat{F}^0(t), \hat{F}^1(t)$ числа подряд идущих интервалов, за которые пришло число бит данных не превышающее порогового значения Th (Off состояния), и интервалов, за которые пришло более Th битов (On состояния). По эмпирическим функциям распределений определим эмпирические функции надежности согласно выражениям $\hat{R}^0(t) = 1 - \hat{F}^0(t), \hat{R}^1(t) = 1 - \hat{F}^1(t)$. Найдём искомые параметры, пользуясь критериями

$$\min_{\{\alpha_0, \tau_0\}} \sum_{i=1}^m \left[\ln \hat{R}^0(i\Delta) - \ln \left(\frac{\tau_0}{i\Delta} \right)^{\alpha_0} \right]^2; \min_{\{\alpha_1, \tau_1\}} \sum_{i=1}^n \left[\ln \hat{R}^1(i\Delta) - \ln \left(\frac{\tau_1}{i\Delta} \right)^{\alpha_1} \right]^2, \quad (5)$$

где n, m – число отсчетов эмпирических функций надежности длительностей On и Off интервалов соответственно. Чтобы подчеркнуть «тяжелые» хвосты распределений в критериях (5) используются прологарифмированные значения функций надежности.

Оценим параметры $\{\alpha_0, \tau_0, \alpha_1, \tau_1\}$ On/Off модели, описывающей трафик локальной сети Ethernet VC-pOct-89 [11], представляющий собой классический образец фрактального трафика, снятый в компьютерной сети лаборатории Bellcore. По предварительно агрегированным данным трафика с параметром агрегирования $\Delta = 1$ мс, используя значение порога Th=500 бит, построим эмпирические функции надежности длин On и Off интервалов (рис. 2).

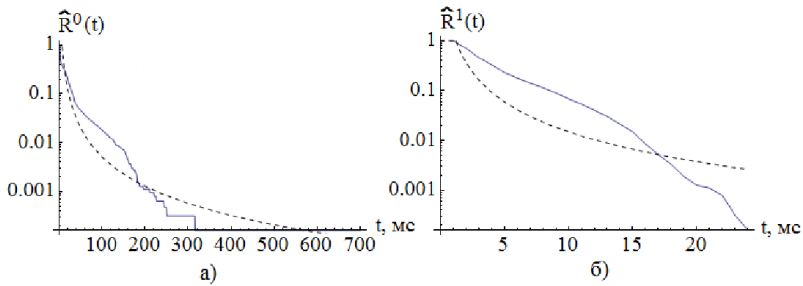


Рис. 2. Эмпирические (сплошные линии) и оцененные (пунктирные линии) функции надежности:
 а) Off-интервалов, б) On-интервалов

В работе были получены следующие оценки параметров распределений Парето, найденные по критериям (5) с использованием алгоритма барьерных функций, реализованного в программном пакете Wolfram Mathematica 8: $\hat{\alpha}_0 = 1,99$; $\hat{\tau}_0 = 7,05$; $\hat{\alpha}_1 = 1,99$; $\hat{\tau}_1 = 1,21$.

5. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СЕТЕВОГО УСТРОЙСТВА

Моделирование проводилось в программном пакете Wolfram Mathematica 8.

На рис. 3 представлены фрагменты реального Ethernet-трафика ВС-рОст89 [11] и трафика, сгенерированного с помощью On/Off модели с параметрами, оцененными в п. 4. Фиксированный уровень On-состояния определялся как выборочное среднее, найденное по отсчетам трафика $x_i > Th$, $i = \overline{1, N}$.

Для описания работы буфера было использовано следующее рекуррентное соотношение:

$$q_i = q_{i-1} + x_i - r_i, \quad (6)$$

где q_i – текущая длина очереди в буфере, выраженная в битах, x_i – входной трафик, r_i – трафик на выходе буфера, определяемый выражением:

$$r_i = \begin{cases} c\Delta, & q_{i-1} + x_i \geq c\Delta, \\ q_{i-1} + x_i, & q_{i-1} + x_i < c\Delta, \end{cases} \quad (7)$$

где c – пропускная способность канала, обслуживаемого буфером.

Средняя длина очереди в буфере определялась как выборочное среднее

$$\bar{q} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N q_i, \quad (8)$$

где N – общее число отсчетов в реализации трафика.

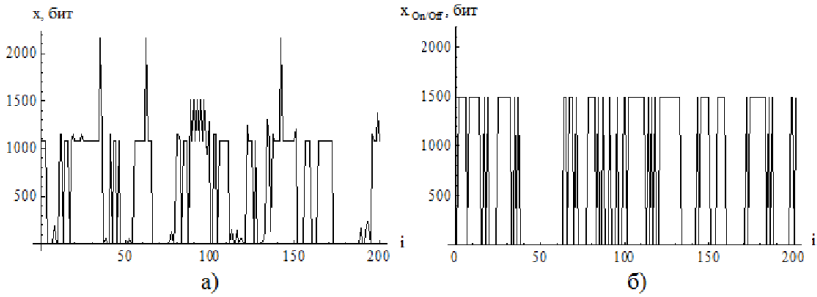


Рис. 3. Фрагмент а) реального трафика б) трафика, сгенерированного с помощью On/Off модели

Согласно выражениям (6-8) были построены зависимости средней длины очереди в буфере сетевого устройства от коэффициента использования выходного канала. На рис. 4 приведены графики зависимостей: $\bar{q}_1(\rho)$ – аналитической зависимости (4), $\bar{q}_2(\rho)$ – эталонной $\bar{q}^*(\rho)$ и $\bar{q}_3(\rho)$ – зависимости, полученной методом моделирования работы сетевого устройства с помощью On/Off процессов. Из графика видно, что в области малых значений ρ наблюдается хорошее совпадение аналитической зависимости $\bar{q}_1(\rho)$ и зависимости $\bar{q}_3(\rho)$, полученной методом моделирования. Однако в области больших значений ρ оценивание средней длины очереди в буфере сетевого устройства с помощью предложенной On/Off модели даёт менее точную оценку для средней длины очереди в буфере, чем формула (4). В то же время обе зависимости далеки от эталонной. Суммарное отклонение (3) зависимостей $\bar{q}_1(\rho)$ и $\bar{q}_3(\rho)$ от эталонной зависимости в интервале значений ρ от 0,3 до 0,95, взятых с шагом 0,05, составило: $s(\bar{q}_3, \bar{q}^*) = 1046$ пакетов и $s(\bar{q}_1, \bar{q}^*) = 856$ пакетов.

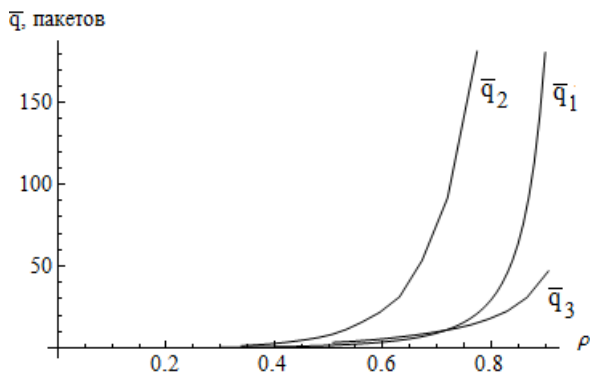


Рис. 4. Зависимость средней длины очереди в буфере от коэффициента использования: 1 – аналитическая зависимость $\bar{q}_1(\rho)$, 2 – эталонная зависимость $\bar{q}_2(\rho)$, 3 – экспериментальная зависимость $\bar{q}_3(\rho)$

6. УЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ТРАФИКА

Значительное расхождение зависимостей средней длины очереди в буфере при обслуживании реального трафика и трафика, сгенерированного с помощью On/Off модели, может быть объяснено тем, что данная модель не учитывает изменение во времени интенсивности реального трафика.

Скорректируем построенную выше зависимость средней длины очереди в буфере от коэффициента использования выходного канала ρ следующим образом

$$\bar{q}'(\rho) = \frac{1}{N-L} \sum_{i=\frac{L}{2}}^{N-\frac{L}{2}} \bar{q}(\rho \frac{S_i}{S_N}), \quad (9)$$

где S_i – усреднённая интенсивность входящего трафика x_i на интервале времени продолжительностью $L\Delta$ в окрестности точки $i\Delta$, определяемая выражением:

$$S_i = \frac{1}{L+1} \sum_{j=i-L/2}^{i+L/2} x_j; \quad (10)$$

$$S_N = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j - \text{средняя интенсивность трафика.}$$

На рис. 5 кривой изображен график усредненной интенсивности входящего трафика S_i , построенной с параметром временного окна

$L = 2000$. Здесь же горизонтальной линией показана средняя интенсивность трафика S_N .

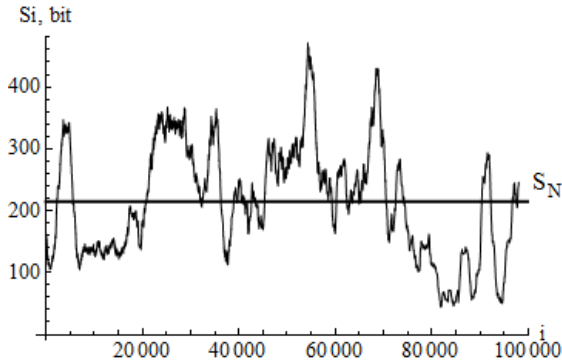


Рис. 5. Усредненная интенсивность входящего трафика S_i с параметром временного окна $L = 2000$

На рис. 6 приведены графики зависимости средней длины очереди в буфере сетевого устройства от коэффициента использования выходного канала, где зависимость $\bar{q}_3(\rho)$ построена по формуле (9).

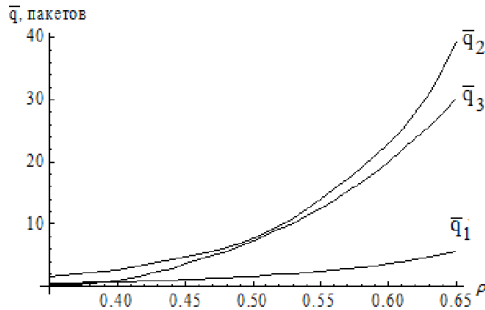


Рис. 6. Зависимость средней длины очереди в буфере от коэффициента использования: 1 – аналитическая зависимость $\bar{q}_1(\rho)$, 2 – эталонная зависимость $\bar{q}_2(\rho)$, 3 – экспериментальная зависимость $\bar{q}_3(\rho)$ с учетом коррекции

Суммарное отклонение (3) зависимостей $\bar{q}_1(\rho)$ и $\bar{q}_3(\rho)$ от эталонной зависимости в интервале значений ρ от 0,3 до 0,65, взятых с шагом 0,05, составило $s(\bar{q}_3, \bar{q}^*) = 16$ пакетов и $s(\bar{q}_1, \bar{q}^*) = 75$ пакетов. Таким образом, применение предложенной процедуры коррекции позволяет повысить точность описания зависимости средней длины очереди в буфере от коэффициента использования выходного канала.

7. ВЫБОР РАЗМЕРА БУФЕРОВ СЕТЕВЫХ УСТРОЙСТВ

Перейдем теперь ко второму вопросу постановки задачи и выберем размер Q буфера сетевого устройства так, чтобы вероятность потери пакета не превышала величины ε при коэффициенте использования выходного канала ρ . Для этого воспользуемся процедурой, основанной на модели трафика в виде On/Off процесса и учитывающей изменение его интенсивности, которая состоит из следующих шагов.

1. По процессу S_i усреднённой интенсивности входящего трафика построим вариационный ряд $S_{(i)}$, то есть упорядоченный по возрастанию ряд из отсчетов процесса вида $S_{(1)} \leq S_{(2)} \leq \dots \leq S_{(N-L-1)} \leq S_{(N-L)}$. Найдём такую интенсивность S_A , чтобы $P(S_i > S_A) < \varepsilon$. Для этого возьмем выборочный квантиль порядка $1-\varepsilon$, то есть положим $S_A = S_{(k)}$, где $k = \lfloor (1-\varepsilon)(N-L) \rfloor + 1$.

2. Найдём коэффициент использования выходного канала $\rho_A = \frac{S_A}{c}$, соответствующий интенсивности входящего трафика S_A .

3. Проведём имитационное моделирование работы сетевого устройства с помощью On/Off модели и находим отсчеты текущей длины очереди q_i , $i = \overline{1, N-L}$ при вычисленном в пункте 2 значении ρ_A .

4. По отсчетам q_i найдём такую величину размера буфера Q , чтобы $P(q_i > Q) < \varepsilon$. Для этого строим вариационный ряд $q_{(i)}$ и берем его выборочный квантиль порядка $1-\varepsilon$, т.е. принимаем $Q = q_{(k)}$, где $k = \lfloor (1-\varepsilon)(N-L) \rfloor + 1$.

На рис. 7 представлена зависимость требуемого размера буфера Q от коэффициента использования выходного канала ρ для $\varepsilon = 0,1$, построенная согласно описанной выше процедуре.

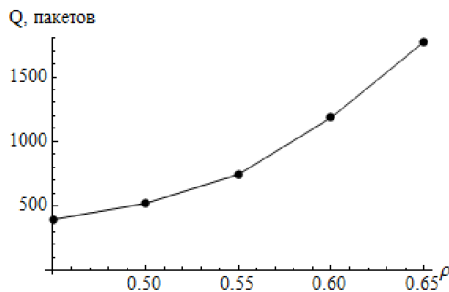


Рис. 7. Зависимость требуемого размера буфера от коэффициента использования выходного канала для $\varepsilon = 0,1$

8. ВЫВОДЫ

В работе рассмотрены методы оценивания средней длины очереди в буферах сетевых устройств, использующих дисциплину FIFO.

Показано, что применение On/Off модели позволяет генерировать самоподобные процессы, статистические свойства которых близки к свойствам Ethernet-трафика. Тем не менее, такие модели не позволяют с требуемой точностью оценивать необходимые характеристики сетевых устройств, обслуживающих фрактальный трафик, так как они не достаточно учитывают динамическое поведение реального трафика. Для учёта влияния изменений интенсивности трафика предложена процедура коррекции On/Off модели, которая позволила повысить, более чем на порядок, точность оценивания средней длины очереди в буфере сетевого устройства.

Предложен метод выбора размера буферов сетевых устройств, содержащий следующие процедуры: оценивание параметров On/Off процесса, описывающего реальный трафик; проверка адекватности On/Off модели трафика согласно критерию (3); моделирование работы сетевого устройства и определение размера буфера сетевого устройства с использованием статистики его заполнения.

Задачей дальнейших исследований является уточнение параметров On/Off модели и учёт динамических свойств реального трафика.

1. Столлингс В. *Современные компьютерные сети* / Столлингс В. – СПб.: Питер, 2003. – 783 с.
2. Бокс Дж. *Анализ временных рядов прогноз и управление (часть 1)* / Дж. Бокс Г. Дженкинс; [пер. с англ. В.Ф. Писаренко]. – М.: Мир, 1974. – 405 с.
3. Xue F. *Traffic Modeling using Farima* / F. Xue, J. Liu, Y. Shu, L. Zhang // *School of Information Technology and Engineering*. – 2007. – № 2. – с. 10-16.
4. Роздымаха Е.А. Моделирование фрактального трафика мульти-сервисных сетей / Е.А. Роздымаха, А.В. Омельченко, А.В. Федоров // *Обработка сигналов и негауссовских процессов: междунар. науч.-техн. конф., 24-27 мая 2011 г.: тезисы докл.* – Черкассы., 2011. – С. 342.
5. Willinger, W. *Self-similarity through high-variability: statistical analysis of Ethernet LAN traffic at the source level* / W. Willinger, M.S. Taqqu, R. Sherman, D.V. Wilson // *Networking, IEEE/ACM Transactions*. – 1997. – № 5. – С. 71-86.
6. Rozdimakha E.A. *Mathematical Model Of Ethernet Traffic* / E.A. Rozdimakha, A.V. Omelchenko, A.V. Fedorov // *Computer Science and Information Technologies: VI-th International Scientific and Technical Conference., 16-19 november. 2011y.: thesis – Lviv., 2011.* – С. 230-232.
7. Yu J. *On propagation of self-similar traffic through an energy-conserving wireless gateway* / J. Yu, P. Petropulu // *Acoustics, Speech, and Signal Processing*. – 2005. – № 4 – p. 285-288.
8. Willinger W. *Self-similarity and heavy tails: Structurel modeling of network traffic* // *A Practical Guide to Heavy Tails Statistical Techniques and Applications: articles / Willinger W., Paxson V., Taqqu M.S.* - Birkhauser Boston Inc., 1998. – Vol. 23. – P. 27 – 53.
9. Norros I. *A Storage Model with Self-Similar Input* / Norros I. // *Queueing Systems*. – 1994. –

Vol. 16. – P. 387 – 396. 10. Роздымаха Е.А. Модель трафика Ethernet в виде On/Off процесса / Е.А. Роздымаха, А.В. Омельченко, А.В. Федоров // Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития: IV междунар. радиоэлектронный форум., 18-21 окт. 2011г.: тезисы докл. – Харьков., 2011. – т.2. – С. 351-353. 11. The Internet Traffic Archive (Ethernet traces of LAN and WAN traffic) [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://ita.ee.lbl.gov/html/contrib/BC.html> (дата обращения: 12.05.2012).