

УДК 621.391

# ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ГРУППОВОГО ТРАФИКА С ЭФФЕКТОМ САМОПОДОБИЯ



Д.В. АГЕЕВ

Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники

**Abstract** – At the current moment, despite the large number of publications in the direction of self-similar traffic studies, deficit of studies involving the use of models for the synthesis of multi-service telecommunication networks. In this regard, this article solves the problem of parametric synthesis of multiservice transport network where aggregated traffic is transmitted from a large number of users. Based on the analysis of publications was selected: model of aggregated traffic in the form of fractional Brownian motion; formulas for determining the parameters of multicast traffic, which resulting in aggregation of multiple flows; formulas for delay and the packet loss probability and proposed methods for the parametrical synthesis of multiservice telecommunication networks with the use of these models and formulas.

In the last part of the paper presents a numerical experiment designed, to compare the synthesis method based on models of self-similar processes with classical previously known methods are based on models of the Poisson flow. When comparing the results of the experiment found that the proposed methods allow more efficient allocation of network resources to carry out than the classical method, which reduces the average delay from 10 to 25% and reduces the likelihood of loss from 12 to 20%.

**Анотація** – У статті наведено модель групового трафіка в мережі і розрахункові вирази для визначення параметрів агрегованого трафіка, часу затримки й ймовірності втрат пакета у вузлах мережі, а також їх значень для всієї мережі. З використанням цих розрахункових виразів наведено та досліджено методи параметричного синтезу мультисервісних телекомунікаційних систем.

**Аннотация** – В статье приведена модель группового трафика в сети и расчетные выражения для определения параметров агрегированного трафика, времени задержки и вероятности потерь пакета в узлах сети, а также их значений для всей сети. С использованием этих расчетных выражений приведены и исследованы методы параметрического синтеза мультисервисных телекоммуникационных систем.

## Введение

Процесс проектирования телекоммуникационной системы является многоэтапным процессом, базирующимся на комплексном применении математических моделей структуры проектируемой системы и физических процессов, протекающих в ней, а также методов синтеза, базирующихся на применении данных математических моделей. Одной из стадий проектирования является параметрический синтез, который подразумевает определение оптимальных (или допустимых, в случае невозможности определения оптимальных) значений параметров элементов при известной структуре системы. Для случая телекоммуникационной сети в качестве таких параметров

обычно выступают пропускные способности каналов связи, производительности коммутационных узлов (серверов и т.д.), объемы буферов, выделяемых для обслуживания потоков при их обработке в узлах сети, и другие параметры.

При решении задач параметрического синтеза во многих случаях недостаточно ограничиться линейными моделями, например, потоковой моделью, которые не учитывают нелинейный характер зависимости качества обслуживания потоков от их интенсивности. В этом случае необходимо установить связь в виде аналитических выражений между параметрами передаваемых потоков и параметрами качества обслуживания. Полученные в результате зависимости необходимо использовать в составе ограничений и целевой функции при решении задач параметрического синтеза.

Наличие у передаваемых через сеть потоков свойств самоподобия оказывает большое влияние на эффективность работы телекоммуникационной сети. Особенно важную роль это играет при параметрическом синтезе телекоммуникационных систем, обеспечивающих передачу мультимедийного трафика и трафика реального времени.

Так статье [1] предложена динамическая модель структурно-функционального синтеза транспортной телекоммуникационной сети. С помощью модели обеспечивается согласованное решение задач по выбору топологии и пропускных способностей трактов передачи транспортной телекоммуникационной сети, распределения потоков и определения порядка подключения абонентов к узлам транспортной сети.

На данный момент существует большое количество публикаций, посвященных исследованию самоподобного трафика.

Так, в работе [2] на основе анализа большого числа работ по исследованию трафика в IP сетях приведена классификация трафика и каждому виду трафика сопоставлен закон распределения. В работе утверждается, что наиболее широко применяются три вида распределений: Парето, Вейбулла и логонормальное.

Среди работ, посвящённых такому важному для решения задач параметрического синтеза исследованию качественных характеристик обслуживания с применением аналитических моделей, можно выделить следующие.

В работе [3] проводится исследование характеристик объединенных потоков с эффектом самоподобия. Получено выражение, позволяющее определить значение параметра Хэрста для случая, когда два объединяемых потока обладают разными значениями данного параметра:

$$H = \max(H_1, H_2).$$

В работах [4, 5], используя модель системы массового обслуживания с асимптотически самоподобным входящим потоком, постоянным временем обслуживания, с заданным числом обслуживающих приборов и ограниченным объемом буферного устройства (т.е. модель  $G|D|m|N$ ), получены верхняя и нижняя границы для вероятности потери сообщения. Для моделирования самоподобного входящего потока использовался ON/OFF источник с постоянной скоростью потока и длительностью периодов активности (ON-период), имеющих распределение типа Парето. Также в работе получено распределение для времени ожидания сообщения в очереди. Данные результаты могут использоваться для определения параметров АТМ коммутаторов при проектировании телекоммуникационных систем.

В работе [6], используя модель фрактального броуновского движения в качестве модели самоподобного процесса, получено выражение для вероятности превышения длины очереди заданной пороговой величины для обслуживающих устройств с бесконечным объемом буфера. При введении дополнительных упрощений в работе получено выражение для требуемого объема буферного устройства, обеспечивающее заранее заданное качество обслуживания по вероятности потерь.

В работе [7], используя модель фрактального броуновского движения, получено выражение связывающее между собой такие параметры узла коммутации, как объем буферного устройства, вероятность потери пакета и интенсивность обслуживания с параметрами обслуживаемого самоподобного трафика: интенсивностью поступления сообщений, дисперсией процесса и параметром Херста. В результате получено выражение для требуемой величины интенсивности обслуживания, при которой обеспечивается заданное ограничение на допустимую вероятность потерь сообщений. В работе [8] с применением средств имитационного моделирования проведено исследование формулы Норроса для пропускной способности системы и подтверждено, что она справедлива при широком диапазоне изменения входящих в нее параметров и рекомендуется инженерам для оценки пропускных способностей каналов связи. Однако приведенное выражение не позволяет учитывать временные затраты на передачу информационных потоков через сеть.

В то же время существует большая нехватка в исследованиях, которые посвящены задачам параметрического синтеза телекоммуникационных систем с обеспечением общесистемных параметров качества обслуживания, базирующихся на использовании моделей самоподобных процессов.

Использование для моделирования информационных потоков в мультисервисных телекоммуникационных системах моделей самоподобных процессов в целях параметрического синтеза выдвигает необходимость решения следующих частных задач:

- выбор математических моделей потоков на различных участках и уровнях мультисервисных телекоммуникационных систем;
- разработка методов определения параметров агрегированных потоков, образуемых при объединении потоков, поступающих на обработку в узел сети или совместно передаваемых в общем канале связи;
- определение расчетных выражений, позволяющих связать между собой параметры качества обслуживания с параметрами передаваемых и обслуживаемых потоков.

Решение первых двух частных задач подробно рассмотрено в работе [9]. В данной статье, базируясь на известных ранее исследованиях самоподобных потоков, получены основные расчетные выражения параметров обслуживания потоков в узлах телекоммуникационной сети, приведены методы параметрического синтеза, базирующиеся на них, и исследована их эффективность.

## **I. Моделирование группового потока в мультисервисной телекоммуникационной сети**

При решении задач параметрического синтеза необходимо выбрать модель группового потока, образуемого при объединении потоков, поступающих от множества источников. По результатам проведенных исследований для моделирования

группового потока с эффектом самоподобия хорошо подходит модель, базирующаяся на применении фрактального Броуновского движения [9]. Эта модель предложена Leland и др. [10] и использована Норросом [6, 7] для получения выражений, описывающих качественные характеристики обслуживания группового самоподобного потока в узлах сети.

Групповой трафик в каналах связи телекоммуникационной сети (фрактальный Броуновский трафик) представляется как

$$\xi(t) = \lambda t + \sqrt{\varsigma \lambda} B_H(t), \quad (1)$$

где  $\xi(t)$  интерпретируется как объем данных, поступивший в интервале  $(0, t]$ . Данная модель трафика была рассмотрена и проанализирована в большом количестве работ [10, 11, 12] и др. для различных технологий сетей с коммутацией пакетов и для различных телекоммуникационных услуг. Сравнение данной модели с характеристиками реального сетевого трафика показали, что модель фрактального Броуновского трафика плохо описывает трафик для малых интервалов промежутков времени, но хорошо подходит для описания трафика на средних и больших интервалах. Таким образом, это свидетельствует, что реальный групповой трафик в сети не является строго самоподобным, он в большей степени проявляет свойства асимптотического самоподобия.

Модель фрактального Броуновского трафика имеет три параметра  $\{\lambda, \varsigma, H\}$ , которые описывают такие характеристики реальных потоков как средняя интенсивность потока  $\lambda$ , измеряемая в пакет/сек или бит/сек и которая является количественной характеристикой трафика, а также параметры  $\varsigma$  (пакет·сек или бит·сек) и безразмерная величина  $H$ , которые описывают качественные характеристики трафика. Параметр  $\varsigma$  является коэффициентом дисперсии

$$\varsigma = \sigma^2 / \lambda.$$

Данный параметр характеризует степень флуктуации потока относительно его среднего значения. Использование параметра  $\varsigma$  вместо дисперсии удобно тем, что при изменении параметра интенсивности потока  $\lambda$ , который может рассматриваться как изменение количества агрегированных однородных потоков, позволяет изменять параметр  $\lambda$ , оставляя при этом неизменными остальные два параметра.

Используемый в выражении (1) процесс  $B_H(t)$  – нормированное фрактальное броуновское движение с нулевым математическим ожиданием  $M[B_H(t)] = 0, \forall t$  и дисперсией  $D[B_H(t)] = |t|^{2H}, \forall t$ . Отметим, что  $B_H(t)$  является математическим объектом, не имеющим физической размерности, и его аргумент  $t$  – тоже безразмерный. Поэтому при моделировании информационных потоков более корректно использовать  $B_H(t/t_u)$ , где  $t$  – физическое время, а  $t_u$  – единица измерения времени.

Отметим также, что при  $H = 1/2$  фрактальное Броуновское движение вырождается в классическое Броуновское движение и процесс  $\xi(t)$ , при  $\varsigma = 1$  совпадает с процессом диффузии, известным из классической теории телетрафика.

Следует также отметить, что комбинация параметров  $\{\lambda, \varsigma, H\}$  в полной мере описывает модель группового трафика, то есть использование данных параметров для оценки качественных параметров обслуживания потока в узлах сети приводит к тому, что любые два потока в сети, характеризующиеся одинаковыми параметрами  $\{\lambda, \varsigma, H\}$ , имеют одинаковые параметры качества обслуживания.

## II. Определение параметров потока при агрегировании групповых потоков

При решении задач параметрического синтеза мультисервисной телекоммуникационной системы возникает необходимость определения, какими свойствами будет обладать агрегированный трафик, если среди объединяемых потоков был поток с эффектом самоподобия, а также – как на свойства самоподобного трафика влияют механизмы обслуживания очередей в узлах телекоммуникационной сети. В данном направлении проведено большое количество исследований как с использованием математических моделей, так и на фрагментах реальных сетей. В работе [5] с использованием аналитических моделей самоподобных процессов приведены и доказаны утверждения, которые позволяют получить расчетные выражения и правила агрегирования групповых самоподобных потоков. Кроме того в указанной работе был проведен анализ параметров для случая наличия в сети потоков как с эффектом самоподобия, так и не обладающих этим свойством.

На основании приведенных в работе [5] теорем можно сделать вывод, что в результате агрегирования двух потоков, из которых хотя бы один обладает свойством самоподобия, результирующий поток будет самоподобным. Приняв для процесса с кратковременной зависимостью (процесс, не обладающий свойством самоподобия) параметр Херста  $H = 0,5$  для процесса  $\xi(t) = \xi'(t) + \xi''(t)$ , получаемого как суперпозиция двух процессов  $\xi'(t)$  и  $\xi''(t)$ , можно записать:

$$H = \max(H_1, H_2).$$

Применив для случая агрегирования более двух потоков  $\xi(t) = \sum_i \xi_i(t)$ ,  $i = 1, \dots, N, N > 2$  операцию попарного агрегирования

$$\xi(t) = (\dots((\xi_1(t) + \xi_2(t)) + \dots + \xi_i) \dots + \xi_N),$$

получаем следующее выражение:

$$H = \max_i(H_i), \quad i = 1, \dots, N. \quad (2)$$



Выражение (2) можно использовать для оценки значения параметра Херста агрегированного потока. Для остальных параметров агрегированных потоков, таких как интенсивность потока  $\lambda$  и коэффициент дисперсии  $\varsigma$ , справедливы следующие выражения:

$$\lambda = \sum_i \lambda_i, \quad (3)$$

$$\varsigma = \frac{\sum_i \varsigma_i \lambda_i}{\sum_i \lambda_i}. \quad (4)$$

Помимо рассмотренного выше метода оценки параметров агрегированного потока важное значение при анализе характеристик сети и при решении задач параметрического синтеза имеет оценка влияния механизмов обработки очереди в узлах сети на характеристики потока с эффектом самоподобия.

В результате проводимых в работе [13] исследований сформулирована и доказана теорема, которая утверждает, что свойства самоподобия для строго асимптотически самоподобного трафика не изменяются в результате ожидания обслуживания в очереди при любой дисциплине обслуживания, если процесс, описывающий длину очереди, имеет конечный второй момент. На основании данной теоремы также можно сделать следующие важные для практики выводы:

1) В результате обработки входящего в узел потока со свойством строго асимптотически самоподобного процесса сохраняются не только его свойства самоподобия, но и остается неизменным параметр Херста  $H$ .

2) При условии конечности второго момента для распределения длины очереди мы можем использовать механизмы динамического выделения пропускной способности каналов связи или другие механизмы гарантирования качества обслуживания, и это не изменяет свойства самоподобного потока. На практике размеры буферов и длина очереди ограничены, и поэтому это условие выполняется.

### **III. Определение параметров качества обслуживания группового потока в узлах мультисервисной телекоммуникационной сети**

Рассмотрим подробнее метод определения параметров качества обслуживания группового потока, образуемого при объединении большого количества потоков от отдельных источников трафика. Применение модели группового потока как фрактального Броуновского трафика позволяет получить выражения для оценки параметров качества обслуживания с использованием модели узла сети, предложенной в работах [6, 7, 14] Норросом. Указанная модель представляет собой систему с накопителем, на вход которой поступает поток, описываемый фрактальным Броуновским трафиком  $\gamma(\lambda, \varsigma, H)$ ; система имеет постоянную интенсивность обслуживания  $\varsigma$ ; трафик, который не успевает обслужиться, накапливается в накопителе. Это модель непрерыв-

ного времени, которая не описывает обработку отдельного пакета в системе, но позволяет получить параметры качества обслуживания трафика в узле для сетей, обеспечивающих передачу большого количества потоков. Поведение модели описывается тремя процессами: процессом поступления, процессом накопления и процессом обслуживания. Опишем их.

Процесс поступления является фрактальным Броуновским трафиком и описывается процессом

$$\xi_{in}(t_1, t_2) = \lambda(t_2 - t_1) + \sqrt{\varsigma\lambda}(B_H(t_2) - B_H(t_1)), \quad t_1, t_2 \in (-\infty, \infty), t_1 \leq t_2,$$

где параметры  $\{\lambda, \varsigma, H\}$  являются параметрами фрактального Броуновского трафика, описанными ранее. Мы также можем записать:

$$\begin{aligned}\xi_{in}(t) &= \xi_{in}(0, t), \quad \forall t \geq 0, \\ \xi_{in}(t) &= -\xi_{in}(t, 0), \quad \forall t \leq 0.\end{aligned}$$

В этом случае  $\xi_{in}(t_1, t_2) = \xi_{in}(t_2) - \xi_{in}(t_1)$ .

Процесс накопления в системе с фрактальным Броуновским трафиком на входе описывается следующим образом

$$\xi_{st}(t) = \sup_{t_1 \leq t_2} (\xi_{in}(t_1, t_2) - c(t_2 - t_1)), \quad t \in (-\infty, \infty). \quad (5)$$

Так как  $B_H(t)$  имеет стационарное приращение, процесс  $\xi_{st}(t)$  является стационарным.

Процесс обслуживания в интервале  $(t_1, t_2]$  описывается как

$$\xi_{out}(t_1, t_2) = \xi_{in}(t_1, t_2) - \xi_{st}(t_2) + \xi_{st}(t_1), \quad (6)$$

$$\xi_{out}(t) = \xi_{out}(0, t), \quad \forall t \geq 0. \quad (7)$$

Из выражений (5) и (6) мы получаем, что

$$\xi_{out}(t) = \xi_{st}(0) + ct - \sup_{t_1 \leq t} (ct_1 - \xi_{in}(t_1)). \quad (8)$$

Используя описанную модель, Норрос получил выражения, связывающие вероятность потерь, требуемую пропускную способность канала связи, среднюю длину очереди, объем буфера [6, 7, 14]. Базируясь на результатах, полученных Норросом можно записать следующие выражения для времени задержки пакета в узле  $\tau$  [15, 16] и вероятности потери пакета из-за переполнения буфера  $P$  [8, 17, 18] при входном трафике с эффектом самоподобия:

$$\tau = \frac{l}{c} \left[ 1 + \frac{\lambda^{2H-1/2(1-H)} \cdot c^{1/2(1-H)}}{(c-\lambda)^{H/1-H}} \right], \quad (9)$$

$$P = \exp \left[ \frac{(c-\lambda)^{2H}}{2k(H)^2 \varsigma \lambda} \ell^{2-2H} \right], \quad (10)$$

где  $l$  - средняя длина пакета;

$$k(H) = H^H (1-H)^{1-H};$$

$\ell$  - емкость буфера.

Приведенные выражения (7), (8) справедливы при следующих условиях:

1) Трафик, поступающий на вход системы, должен быть Гауссовым, то есть агрегированным от большого количества независимых источников, интенсивность которых намного меньше интенсивности группового потока [19].

2) Вывод формул базировался на использовании распределения Вейбулла для аппроксимации распределения длины очереди [20]. Эта аппроксимация логарифмически точна для больших объемов буферных устройств. Таким образом, размер буфера должен быть большим, для того чтобы формула была адекватной.

При параметрическом синтезе фрагмента сети и его узлов, обеспечивающих передачу групповых мультисервисных потоков, приведенные выше условия выполняются, следовательно, выражения (9) и (10) могут быть использованы для оценки качества обслуживания передаваемых потоков.

#### **IV. Выбор параметров телекоммуникационной системы с учетом вероятности непревышения требуемой задержки пакета**

При параметрическом синтезе современных телекоммуникационных сетей важной характеристикой является обеспечение гарантии качества обслуживания между конечными узлами.

Решению данной задачи посвящена работа [21], в которой в качестве модели самоподобного потока в сети применялось фрактальное броуновское движение, и получены аппроксимации для величины длины очереди и времени задержки для узла с дисциплиной обслуживания в порядке поступления. Результат был получен за счет введения огибающего процесса  $\hat{\xi}_{in}(t) = \lambda t + \eta \sigma t^H$ , который ограничивает процесс поступления  $\xi_{in}(t)$ . Однако в данной работе не приведены результаты, позволяющие определить вероятность, с которой данная величины задержки достигается.

Дальнейшее развитие данный подход получил в работе [13], что дало возможность одновременно с величиной задержки определять вероятность, что задержка не превысит заданного уровня. Последнее позволяет оценить необходимую величину выделяемой пропускной способности каналов связи для обеспечения гарантии на задержку пакета в сети между конечными узлами.

Дадим определение огибающего процесса. Пусть  $\xi_{in}(t)$  - fBM процесс, описывающий входящий поток в узел сети. Процесс  $\hat{\xi}_{in}(t) = \lambda t + \eta \sigma t^H$  называется огибающим процесса  $\xi_{in}(t)$  с уровнем погрешности  $\varepsilon$  и длительностью  $\tau_b$  таким, что

$$P\{\xi_{in}(t) \leq \hat{\xi}_{in}(t), t = 1, 2, \dots, \tau_b\} \geq 1 - \varepsilon.$$

Для процесса, описываемого моделью fBM:

$$P\{\xi_{in}(t) \leq \hat{\xi}_{in}(t), t = 1, 2, \dots, \tau_b\} = P\{Z(t) \leq \eta t^H, t = 1, 2, \dots, \tau_b\}.$$



На практике для задания огибающего процесса нам необходимо определить значение параметра  $\eta$  для заданных параметров  $\varepsilon$  и  $\tau_b$ . В работе [13] значение параметра  $\eta$  предлагается определять из условия  $P\{Z(1) > \eta\} = \varepsilon / \tau_b$ , тогда можно записать:

$$P\{\xi_{in}^i(t) \leq \hat{\xi}_{in}^i(t), t = 1, \dots, \tau_b\} \geq 1 - \tau_b P\{Z(1) > \eta\} = 1 - \varepsilon.$$

Использование огибающего процесса позволяет получить ценные для решения задач параметрического синтеза выражения для задержки пакета в узле сети с заданным уровнем гарантии. Ниже приведены выражения для двух часто используемых на практике дисциплин обслуживания такие как обслуживание в порядке поступления и обслуживание с абсолютным приоритетом.

Рассмотрим первый случай. На узел сети с дисциплиной обслуживания в порядке поступления поступают  $n$  потоков, каждый из которых описывается процессом  $\xi_{in}^i(t) = \lambda_i t + \sigma_i Z(t)$ ,  $i = 1, \dots, n$ , огибающий процесс для входящего потока описывается процессом  $\hat{\xi}_{in}^i = \lambda_i t + \eta_i \sigma_i t^H$  с погрешностью  $\varepsilon$  и длительностью  $\tau_b$ , для длительности занятости системы  $\tau$  выполняется условие  $P\{\tau > \tau_b\} \leq p$ , тогда задержка пакета для  $i$ -го потока не превышает величины  $\hat{\tau}$

$$\hat{\tau} = \max_t \left\{ \frac{1}{c} \sum_{j=1}^n \hat{\xi}_{in}^j(t) - t \right\} \quad (11)$$

с вероятностью не меньшей, чем  $(1-p)(1 - \sum_{j=1}^n \varepsilon_j)$ , где  $c$  - пропускная способность канала.

Во втором случае на узел сети поступает  $n$  потоков, и приоритеты обслуживания расставлены согласно индексам потоков. Процесс  $\hat{\xi}_{in}^i(t) = \lambda_i t + \eta_i \sigma_i t^{H_i}$ ,  $i = 1, \dots, n$  является огибающим для входящего потока, описываемого процессом  $\xi_{in}^i(t) = \lambda_i t + \sigma_i Z(t)$  с погрешностью  $\varepsilon_i$  и длительностью  $\tau_b$ , для длительности занятости системы  $\tau$  выполняется условие  $P\{\tau > \tau_b\} \leq p$ , тогда задержка пакета для  $i$ -го потока не превышает величины

$$\hat{\tau}_i = \max_x \{S_i^{-1}(x) - \hat{\xi}_i^{-1}(t)\}, \quad (12)$$

с вероятностью не меньшей, чем  $(1-p)(1 - \sum_{j=1}^i \varepsilon_j)$ , где  $\hat{\xi}_i^{-1}(x)$  и  $S_i^{-1}(t)$  обратные функции для  $\hat{\xi}_{in}^i(t)$  и  $S_i(t)$  соответственно, и

$$S_i(t) = \left\{ ct - \sum_{j=1}^{i-1} \hat{\xi}_{in}^j(t) \right\}^+,$$

где операция  $f^+$  над функцией  $f$  определяется как

$$f^+ = \begin{cases} f, & f > 0; \\ 0, & f \leq 0. \end{cases}$$

В телекоммуникационных сетях с установкой соединения трафик между конечными узлами передается по маршруту определяемого на этапе инициализации соединения. Кроме этого при решении задач параметрического синтеза телекоммуникационных сетей маршруты передачи потоков между конечными узлами считаются известными и обычно принимаются неизменными. Наличие точных данных о маршрутах передачи потоков между конечными узлами позволяет оценить задержку пакетов в сети, которая определяется как сумма задержек на каждом из узлов сети, содержащихся в маршруте передачи потока.

$$\hat{\tau}' = \sum_i \hat{\tau}_i. \quad (13)$$

При определении времени задержки пакета в сети мы можем воспользоваться нижеприведенной теоремой, которая позволяет нам знать характеристики потока в любом элементе телекоммуникационной сети. Так как самоподобный процесс, моделируемый fBM, является строго асимптотически самоподобным, то нам, в данном случае, достаточно определить параметр Херста потока на входе сети, в остальных элементах его можно принять неизменным. Расчет времени задержки пакета в сети можно производить с использованием следующей теоремы [3, 13].

#### Теорема.

Если маршрут передачи потока содержит  $N$  узлов и при обслуживании в узле  $z_i \in Z, i = 1, \dots, N$  возникает задержка, не превышающая  $\hat{\tau}_i$  с вероятностью  $1 - p_i$ , тогда величина задержки между конечными узлами не превышает  $\hat{\tau}' = \sum_{i=1}^N \hat{\tau}_i$  с вероятностью  $p' = 1 - \sum_{i=1}^N p_i$ .

Задача оценки времени задержки пакета в сети в этом случае решается с использованием следующей методики.

1. Определяем маршруты передачи потоков между всеми парами конечных узлов.
2. Определяем множество потоков совместно передаваемых в каждом из исходящих каналов связи для каждого из узлов сети.
3. Определяем задержку для каждого из узлов сети с использованием выражений (11) или (12) в зависимости от дисциплины обслуживания, применяемой в узле сети.
- 4 Для каждого потока определяем задержку между конечными узлами с использованием выражения (13).

## **V. Метод параметрического синтеза мультисервисных телекоммуникационных сетей**

Рассмотрим пример применения предложенных выше математических моделей мультисервисных потоков и расчетных выражений при решении задачи выбора оптимальных значений параметров структурных элементов телекоммуникационной системы. Ниже приведены постановки и решены следующие задачи параметрического синтеза как

- задача выбора оптимальных значений пропускных способностей каналов связи согласно критерию минимума среднего времени задержки пакета в сети при ограничении на величину суммарных затрат на сеть.

- задача выбора оптимальных значений пропускных способностей каналов связи и емкостей буферных устройств согласно критерию минимума стоимости сети при ограничении на максимально допустимую среднесетевую задержку пакета в сети и максимально допустимую вероятность потери пакета между оконечными узлами.

Синтезируемая телекоммуникационная сеть обеспечивает передачу информационных потоков между узлами сети  $a_i \in A$ , являющимися источниками группового мультисервисного трафика, и содержит кроме узлов-источников транзитные узлы  $z_i \in Z$ , которые не продуцируют собственные информационные потоки и служат для передачи потоков других узлов сети.

Исходными данными для решения данной задачи является:

- данные об узлах сети  $A = \{a_i\}$  – источниках информационных потоков;
- данные о перечне услуг  $S = \{s_k\}$ , предоставляемых в сети;
- данные о параметрах потоков  $\gamma_{ij}^k$ , передаваемых между всеми парами узлов  $(a_i, a_j)$  отправитель-получатель при предоставлении услуги  $s_k$ ;
- топология сети и маршруты передачи информационных потоков между всеми парами узлов отправитель-получатель;
- удельные затраты  $\alpha_{ij}$  на организацию канала связи  $(a_i, a_j)$  единичной пропускной способностью.

В результате решения задачи параметрического синтеза необходимо определить значения пропускных способностей каналов связи  $c_{ij}$  таким образом, чтобы суммарные затраты на организацию сети с выбранными значениями пропускных способностей каналов связи не превышали заранее определенную величину  $\Psi_{\text{дон}}$ .

В качестве критерия оптимальности полученного варианта решения задачи параметрического синтеза является минимум среднесетевой задержки пакета в сети.

Базируясь на предметной постановке задачи, приведенной выше, опишем ее математическую постановку.

Каждому ребру графа припишем параметр  $\alpha_c(e_{ij}, c_{ij})$ , задающий затраты на организацию канала связи пропускной способностью  $c_{ij}$ . При решении данной задачи примем затраты, имеющие линейную зависимость от пропускной способности канала связи:

$$\alpha_c(e_{ij}, c_{ij}) = \alpha_{ij} \cdot c_{ij},$$

где  $\alpha_{ij}$  - удельная стоимость единицы пропускной способности канала связи, которому соответствует ребро  $e_{ij}$ .

Каждому ребру  $e_{ij}$  припишем поток  $\gamma_{ij}^k \in Y^k$ , где  $Y^k$  - множество информационных потоков, передаваемых между узлами сети при предоставлении услуги  $s_k$ . Зададим параметры передаваемых потоков следующим образом:

$\gamma_{ij}^k = (\lambda_{ij}^k, t_{ij}^k, \varsigma_{ij}^k, H_{ij}^k)$  - набор параметров информационного потока, передаваемого между узлом  $a_i$  и  $a_j$  при предоставлении услуги  $s_k$ ;

$\lambda_{ij}^k$  - интенсивность потока, бит/с;

$t_{ij}^k$  - средняя длина пакета, бит;

$\varsigma_{ij}^k$  - коэффициент дисперсии;

$H_{ij}^k$  - параметр Херста.

Поток  $\gamma_{ij}$  образуется в результате объединения потоков, соответствующих потокам, образуемым при предоставлении услуг

$$\gamma_{ij} = \sum_{\substack{k=1, \dots, K, \\ e_{lm} \in E, e_{ij} \in \pi_{(lm)}^k}} \gamma_{lm}^k.$$

Параметры агрегированных потоков, протекающих по ребрам графа, можно определить согласно методике, описанной ранее (выражения (2), (3), (4)). На основании этого можно записать:

$$\lambda_{ij} = \sum_{\substack{k=1, \dots, K, \\ e_{lm} \in E, e_{ij} \in \pi_{(lm)}^k}} \lambda_{lm}^k, \quad (14)$$

$$t_{ij} = \frac{\sum_{\substack{k=1, \dots, K, \\ e_{km} \in E, e_{ij} \in \pi_{(lm)}^k}} (t_{lm}^k \lambda_{lm}^k)}{\left[ \sum_{\substack{k=1, \dots, K, \\ e_{km} \in E, e_{ij} \in \pi_{(lm)}^k}} \lambda_{lm}^k \right]}, \quad (15)$$

$$\varsigma_{ij} = \frac{\sum_{\substack{k=1, \dots, K, \\ e_{km} \in E, e_{ij} \in \pi_{(lm)}^k}} (\varsigma_{lm}^k \cdot \lambda_{lm}^k)}{\left[ \sum_{\substack{k=1, \dots, K, \\ e_{km} \in E, e_{ij} \in \pi_{(lm)}^k}} \lambda_{lm}^k \right]}, \quad (16)$$

$$H_{ij} = \max_{\substack{k=1, \dots, K, \\ e_{lm} \in E, e_{ij} \in \pi_{(lm)}^k}} [H_{lm}^k]. \quad (17)$$

В этом случае среднесетевую задержку с использованием выражения (8) согласно формуле Литтла [22] можно определить как:

$$\bar{T}(\Gamma, Y, c(e)) = \frac{1}{\Lambda} \sum_{e_{ij} \in E} \left[ \frac{\lambda_{ij}}{c_{ij}} \left( 1 + \frac{(\lambda_{ij})^{(2H_{ij}-1)/(2-2H_{ij})} \cdot c_{ij}^{1/(2-2H_{ij})}}{(c_{ij} - \lambda_{ij})^{H_{ij}/(1-H_{ij})}} \right) \right], \quad Y = \{Y^k\}, \quad (18)$$

$$\Lambda = \sum_{k=1, \dots, K} \sum_{\substack{\gamma_{lm}^k, \\ e_{km} \in E}} \lambda_{lm}^k / t_{lm}^k. \quad (19)$$

Таким образом, основываясь на приведенной математической модели, задачу параметрического синтеза сформулируем как оптимизационную задачу следующего вида.

Задано:

$Y = \{Y^k\}$  - множество потоков, протекающих по ребрам графа.

Найти:

$c_{ij}, \forall e_{ij} \in E$  - пропускные способности ребер графа  $\Gamma$ , соответствующих каналам связи синтезируемой мультисервисной телекоммуникационной сети.

Критерий оптимальности:

$$\bar{T}(\Gamma, Y, c(e)) \rightarrow \min. \quad (20)$$

Ограничения:

$$\sum_{e_{ij} \in E} \alpha_{ij} \cdot c_{ij} \leq \Psi_{don}, \quad (21)$$

$$\gamma_{ij} = \sum_{\substack{k=1, \dots, K, \\ e_{lm} \in E, e_{ij} \in \pi_{lm}^k}} \gamma_{lm}^k, \quad (22)$$

$$\lambda_{ij} < c_{ij}, \quad \forall e_{ij} \in E. \quad (23)$$

Выражение (20) является целевой функцией и формирует критерий минимума среднесетевой задержки пакета в сети. Значение функции  $\bar{T}(\Gamma, Y, c(e))$  определяется из выражения (18), (19).

Условие (21) является ограничением на максимально допустимые расходы на организацию каналов связи искомой пропускной способностью.

Выражение (22) позволяет определить параметры результирующего потока в каналах связи синтезируемой сети. При этом частные параметры агрегированного потока необходимо определять из (14)-(17).

Условие (23) гарантирует не превышение интенсивности потока значения пропускной способности ребер графа (пропускной способности каналов связи).

Задача параметрического синтеза (20)-(23) решена и исследована в работах [16, 23, 24]. Данная задача решена с применением метода наискорейшего спуска.

Анализ целевой функции (20) показал, что она является строго выпуклой функцией и, следовательно, существует единственная стационарная точка, которая и является глобальным минимумом.

С другой стороны – анализ целевой функции и ограничений задачи показал, что решение задачи лежит на границе допустимой области, и в этом случае неравенство

(21) превращается в равенство. Это позволяет с применением условия (21) в виде равенства выразить пропускную способность одного из ребер через пропускные способности других ребер. После подстановки найденной зависимости в целевую функцию задача с ограничениями преобразуется в задачу без ограничений, что позволяет напрямую применить метод наискорейшего спуска.

В качестве другого примера рассмотрим задачу параметрического синтеза в следующей предметной постановке. Аналогично предыдущему случаю телекоммуникационная сеть обеспечивает передачу информационных потоков между узлами сети  $a_i \in A$ , являющимися источниками группового мультисервисного трафика, и содержит кроме узлов-источников транзитные узлы  $z_i \in Z$ , которые не продуцируют собственные информационные потоки и служат для передачи потоков других узлов сети.

Исходными данными, аналогично рассмотренной ранее задаче, являются: данные об узлах сети и потребляемыми ими услугами; данные о параметрах потоков, передаваемых между узлами сети при предоставлении заданной услуги; известна топология сети и маршруты передачи потоков между всеми парами узлов отправитель-получатель; известны удельные затраты на организацию канала связи единичной пропускной способности, а также удельные затраты на буферные устройства.

В результате решения задачи параметрического синтеза необходимо определить значения пропускных способностей каналов связи  $c_{ij}$  и емкости буферных устройств  $\ell_{ij}$  в узлах сети таким образом, чтобы среднесетевая задержка  $\bar{T}$  и вероятность потерь пакета в сети  $P_{ij}$  не превышали заранее заданные допустимые значения ( $\bar{T}_{дон}$  и  $P_{дон}$ ).

Критерием оптимальности полученного варианта решения задачи параметрического синтеза является минимум затрат на организацию сети с выбранными значениями параметров структурных элементов синтезируемой мультисервисной телекоммуникационной системы.

Математическая модель структуры синтезируемой мультисервисной телекоммуникационной системы аналогична предыдущей решаемой задаче и дополнена следующими параметрами.

Каждому ребру  $e_{ij}$  графа  $\Gamma$  приписываем параметр  $\ell_{ij}$ , который определяет емкость буфера, выделяемого в узле  $a_i$  для обслуживания потока, передаваемого смежному узлу  $a_j$ . В этом случае вероятность потерь пакета за счет переполнения буфера  $p(c_{ij}, \gamma_{ij}, \ell_{ij})$  определяется с использованием выражения (10).

Решаемую задачу параметрического синтеза сформулируем как оптимизационную задачу следующего вида.

Задано:

$\Gamma = (V, E, \alpha(e), \alpha^\ell(l))$  - граф, описывающий топологию мультисервисной телекоммуникационной сети;

$Y = \{Y^k\}$  - множество потоков, протекающих по ребрам графа.

Найти:



$c_{ij}, \forall e_{ij} \in E$  - пропускные способности каналов связи синтезируемой мультисервисной телекоммуникационной сети;

$\ell_{ij}^k, \forall e_{ij} \in E$  - емкости буферных устройств, выделенных для обслуживания потока, передаваемого по каналам связи синтезируемой сети.

Критерий оптимальности:

$$\sum_{e_{ij} \in E} (\alpha_{ij} \cdot c_{ij} + \alpha_{ij}^l \cdot \ell_{ij}) \rightarrow \min. \quad (24)$$

Ограничения:

$$\bar{T}(\Gamma, Y, c(e)) \leq \bar{T}_{don}, \quad (25)$$

$$1 - \prod_{e_{ij} \in \pi_{lm}^k} [1 - p(c_{ij}, \gamma_{ij}, \ell_{ij})] \leq P_{don}, \quad \forall k, e_{lm} \in E, \quad (26)$$

$$P(c_{ij}, \gamma_{ij}, \ell_{ij}) = \exp \left[ \frac{(c_{ij} - \lambda_{ij})^{2H_{ij}}}{2 \left[ (H_{ij})^{H_{ij}} (1 - H_{ij})^{(1-H_{ij})} \right]^2 \zeta_{ij} \lambda_{ij}} (\ell_{ij})^{2-2H_{ij}} \right], \quad (27)$$

$$\gamma_{ij} = \sum_{\substack{k=1, \dots, K, \\ e_{km} \in E, e_{ij} \in \pi_{lm}^k}} \gamma_{lm}^k, \quad (28)$$

$$\lambda_{ij} < c_{ij}, \quad \forall e_{ij} \in E. \quad (29)$$

Выражение (24) является целевой функцией и формирует критерий минимума затрат на организацию сети с выбранными значениями параметров структурных элементов системы.

Условие (25) является ограничением на максимально допустимую среднесетевую задержку пакета в сети. Значение функции  $\bar{T}(\Gamma, Y, c(e))$  определяется из выражений (18), (19).

Неравенство (26) является ограничением на максимально допустимую величину вероятности потерь пакета в сети для каждого из передаваемых потоков в синтезируемой сети. Выражение (27) позволяет определить вероятность потерь в каждом из каналов синтезируемой сети.

Выражение (28) позволяет определить параметры результирующего потока в каналах связи синтезируемой сети. При этом частные параметры агрегированного потока необходимо определять из (14)-(17).

Условие (29) гарантирует не превышение интенсивности потока - значения пропускной способности ребер графа (пропускной способности каналов связи).

Задача параметрического синтеза (24)-(29) относится к задачам нелинейного программирования, и для ее решения использовался пакет математического моделирования The MathWorks MATLAB. Метод ее решения приведен в работах [17, 25, 26].

## VI. Исследование эффективности приведенных методов параметрического синтеза

Проведем исследование достоверности результатов определения пропускных способностей каналов связи, производимого с использованием предлагаемого в работе метода параметрического синтеза. Для этого воспользуемся пакетом имитационного моделирования ns-2. Суть проводимого эксперимента заключается в имитационном моделировании телекоммуникационной сети, пропускные способности каналов связи которой определялись разными методами. Схема имитационной модели представлена на рис. 1.

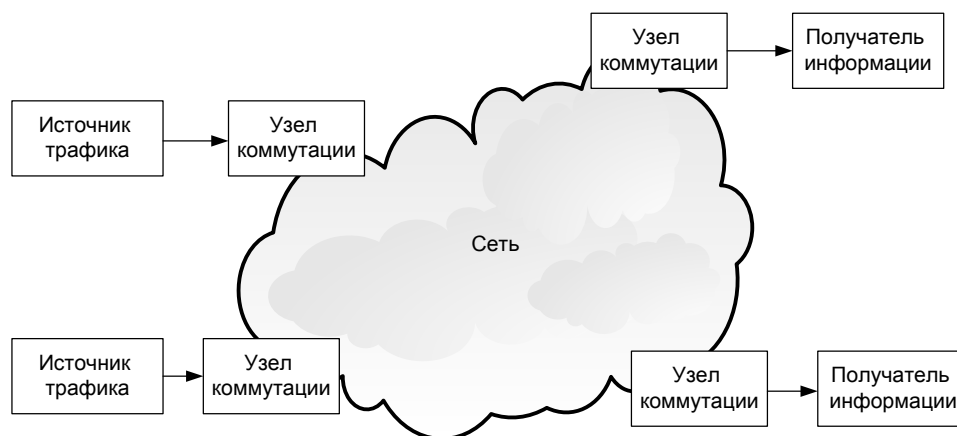


Рис. 1. Схема эксперимента по моделированию фрагмента сети

Источниками самоподобного трафика в данном эксперименте являются реализации реального сетевого трафика, полученного при мониторинге фрагмента мультисервисной сети при передаче по ней различных типов нагрузки и поступающей на узлы сети. Посредством узлов коммутации полученный таким образом самоподобный поток упаковывается в UDP-пакеты и передается в сторону получателя. Трафики самоподобных источников имеют в составе своего пути к получателю общие участки сети.

В процессе проведения эксперимента система (рис.1) изучается в двух конфигурациях:

- в первой конфигурации параметры каналов связи определяются с использованием ранее известного метода, базирующегося на предположении о пуассоновском характере передаваемых потоков;
- во второй конфигурации параметры каналов связи определяются с использованием предлагаемых в статье методов параметрического синтеза с использованием моделей самоподобных процессов.

При проведении имитационного моделирования фиксировались реализации информационных потоков, передаваемых по сети, с последующим их анализом на величину среднесетевой задержки в сети.

Эксперимент проводился для различных наборов поступающих в сеть потоков. Для каждого варианта поступающего в сеть потока производилось оценка значений

его параметров в рамках пуассоновской (интенсивность потока и средняя длина пакета) и самоподобной модели (интенсивность потока, средняя длина пакета и значение параметра Херста). В дальнейшем с использованием полученных значений параметров потоков производился выбор пропускных способностей каналов связи.

Результаты эксперимента представлены в табл. 1, где  $H$  - значение параметра Херста для потоков поступающих в сеть;  $\bar{T}$  - среднесетевая задержка пакета в сети, соответствующая значению целевой функции при решении задачи;  $\bar{T}_{п.м.}$ ,  $\bar{T}_{с.м.}$  - экспериментально полученные значения задержки для конфигураций сети, рассчитанных с использованием пуассоновской модели и с использованием модели самоподобных процессов.

Таблица 1. Результаты эксперимента по исследованию метода определения пропускных способностей каналов связи

| Вариант набора исходных данных | $H$  | $\bar{T}$ , мс | $\bar{T}_{п.м.}$ , мс | $\bar{T}_{с.м.}$ , мс |
|--------------------------------|------|----------------|-----------------------|-----------------------|
| Вариант 1                      | 0,65 | 9,8 мс         | 14,3                  | 9,1                   |
| Вариант 2                      | 0,65 | 49,5 мс        | 65,4                  | 52,2                  |
| Вариант 3                      | 0,71 | 20,3 мс        | 27,1                  | 21,3                  |
| Вариант 4                      | 0,71 | 71,2 мс        | 88,6                  | 73,1                  |
| Вариант 5                      | 0,75 | 29,9 мс        | 36,1                  | 28,7                  |
| Вариант 6                      | 0,75 | 35,5 мс        | 50,5                  | 36,5                  |

Анализ результатов эксперимента (табл. 1) позволяет сделать следующие выводы:

- предлагаемый метод позволяет более точно определить пропускные способности каналов связи, при которых среднесетевая задержка на практике наиболее близко соответствуют величине, ожидаемой при решении задачи параметрического синтеза;
- в результате эксперимента было подтверждено, что применение методов, базирующихся на пуассоновской модели потоков, дает заниженные требования к ресурсам сети, что приводит к конфигурациям, имеющим более высокие значения среднесетевой задержки и, соответственно, обладающими более худшими параметрами качества обслуживания.

С использованием методики аналогичной предыдущему случаю проведем исследование метода определения пропускных способностей каналов связи и емкостей буферных устройств. Результаты эксперимента представлены в табл. 2, где  $\bar{T}_{доп}$  и  $P_{доп}$  - среднее время задержки и вероятность потерь, используемые в качестве ограничений при решении задачи параметрического синтеза;  $\bar{T}_{п.м.}$  и  $P_{п.м.}$  - результаты, полученные экспериментально для сети, рассчитанной с применением пуассоновской модели потока;  $\bar{T}_{с.м.}$  и  $P_{с.м.}$  - результаты, полученные экспериментально для сети, рассчитанной предложенным в работе методом.

Таблица 2. Значения вероятностно-временных характеристик

| Вариант набора исходных данных | Ограничения при решении задачи |                    | BBX сети при использовании пуассоновских потоков |                       | BBX сети при использовании самоподобных процессов |                       |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------------|-----------------------|
|                                | $\bar{T}_{\text{доп}}$ , мс    | $P_{\text{доп}}$   | $\bar{T}_{\text{п.м.}}$ , мс                     | $P_{\text{п.м.}}$     | $\bar{T}_{\text{с.м.}}$ , мс                      | $P_{\text{с.м.}}$     |
| Вариант 1                      | 10                             | $5 \times 10^{-8}$ | 11,7                                             | $6,28 \times 10^{-8}$ | 10,2                                              | $4,93 \times 10^{-8}$ |
| Вариант 2                      | 20                             | $7 \times 10^{-8}$ | 24,7                                             | $7,79 \times 10^{-8}$ | 20,3                                              | $7,12 \times 10^{-8}$ |
| Вариант 3                      | 50                             | $3 \times 10^{-6}$ | 61                                               | $3,6 \times 10^{-6}$  | 49,5                                              | $3,15 \times 10^{-6}$ |
| Вариант 4                      | 200                            | $2 \times 10^{-6}$ | 247,3                                            | $2,36 \times 10^{-6}$ | 198,4                                             | $1,87 \times 10^{-6}$ |

Анализ полученных результатов показал, что предложенный в работе метод параметрического синтеза позволяет более эффективно осуществить распределение ресурса сети, чем классический, за счет учета наличия в передаваемых потоках эффекта самоподобия. Это приводит к уменьшению среднего времени задержки и вероятности потери пакетов в сети от 10% до 20%. Таким образом, применение разработанного метода на этапе проектирования мультисервисных сетей NGN позволит повысить качество предоставления услуг.

## Выводы

При синтезе мультисервисных телекоммуникационных сетей одной из наиболее важных задач является обеспечение требуемого качества обслуживания, которое достигается при параметрическом синтезе. Методы параметрического синтеза позволяют использовать как линейные, так и нелинейные модели и учитывать наличие функциональных и вероятностных зависимостей между параметрами передаваемых потоков и параметрами качества обслуживания.

Для разработки методики синтеза мультисервисных сетей в качестве математических моделей потоков на различных участках мультисервисной телекоммуникационной сети использованы модели самоподобных процессов. Указанные модели позволяют учитывать такие свойства, характерные потокам в мультисервисных сетях: долговременную зависимость, высокую пачечность, наличие распределения с тяжелыми хвостами для межпакетных интервалов и длительностей занятий обслуживающих устройств, медленно затухающую дисперсию выборочного среднего.

В работе удалось получить функциональные зависимости между параметрами качества обслуживания с параметрами передаваемых и обслуживаемых потоков с приоритетами и без приоритетов в обслуживании. Для этого были использованы математические модели фрактального Броуновского трафика. Полученные функциональные зависимости позволяют находить такие параметры обслуживания как: время задержки в узле и вероятность отказа в обслуживании, принятые при этом допущения являются достаточно общими и выполнимыми в реальных сетях.

Выбранные и обоснованные в статье математические модели потоков как самоподобных процессов, и полученные расчетные выражения были использованы при

разработке методик параметрического синтеза мультисервисных телекоммуникационных сетей. Разработанные методики позволяют решить такие задачи как:

- выбор пропускных способностей каналов связи при использовании критерия минимума среднесетевой задержки и ограничения на величину максимально допустимых затрат на организацию сети;
- совместный выбор пропускных способностей каналов связи и емкостей буферных устройств при использовании критерия минимума затрат и ограничений на максимально допустимую среднесетевую задержку и вероятность потери пакета.

По результатам исследования эффективности предложенных методов с использованием имитационного моделирования установлено, что предложенные методы позволяют более эффективно осуществлять распределение сетевых ресурсов, чем классический метод, что приводит к уменьшению средней задержки от 10 до 25% и уменьшает вероятность потерь от 12 до 20%.

Предложенные в работе математические модели потоков и методы параметрического синтеза мультисервисных телекоммуникационных сетей могут найти свое применение при разработке автоматизированных систем проектирования, что позволит повысить качество принятых проектных решений по экономическим и техническим параметрам.

### Список литературы:

1. Лемешко А.В., Стерин В.Л. Динамическая модель структурно-функционального синтеза транспортной ТКС [Электронный ресурс] // Проблемы телекоммуникаций. – 2011. – № 3 (5). – С. 8 – 17. – Режим доступа: [http://pt.journal.kh.ua/2011/3/1/113\\_lemeshko\\_synthesis.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2011/3/1/113_lemeshko_synthesis.pdf).
2. Симонина О.А. Яновский Г.Г. Характеристики трафика в сетях IP // Труды учебных заведений связи. – 2004. – № 177. – С. 8–14.
3. Some New Findings on the Self-Similarity Property in Communications Networks and on Statistical End-to-End Delay Guarantee: Technical Report [JNG05-01] / Department of Computer Science, Hong Kong Baptist University; manager Joseph Kee-Yin Ng; contractors: Shibin Song, Bi Hai Tang. – Hong Kong, 2001. – 14 p.
4. Цыбаков Б.С. Модель телетрафика на основе самоподобного случайного процесса // Радиотехника. – 1999. – № 5. – С. 24–31.
5. Tsybakov B., Georganas N.D. On self-similar traffic in ATM queues: definition, overflow probability bound, and cell delay distribution // IEEE/ACM Trans. on Networking. – 1997. – Vol. 5, No 3. – P. 397–408.
6. Norros I. A Storage Model with Self-Similar Input // Queueing Systems. – 1994. – Vol. 16, No 3-4. – P. 387–396.
7. Norros I. On the use of fractional Brownian motion in the theory of connectionless networks // Selected Areas in Communications, IEEE Journal. – 1995. – Vol. 13, Issue 6. – P. 953–962.
8. Patel A., Williamson C. Statistical Multiplexing of Self-Similar Traffic: Theoretical and Simulation Results [Electronic resource] // University of Saskatchewan, Department of Computer Science, 1997. – Mode of access: <http://www.cs.usask.ca/faculty/carey/papers/statmuxing.ps>.
9. Азеев Д.В., Игнатенко А.А., Копылев А.Н. Методика определения параметров потоков на разных участках мультисервисной телекоммуникационной сети с учетом эффекта самопо-



добия [Электронный ресурс] // Проблемы телекоммуникаций. – 2011. – № 3 (5). – С. 18 – 37. – Режим доступа: [http://pt.journal.kh.ua/2011/3/1/113\\_ageyev\\_method.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2011/3/1/113_ageyev_method.pdf).

10. Leland W.E., Taqqu M.S., Willinger W., Wilson D.V. On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic (Extended Version) // IEEE/ACM Trans, on Networking. – 1994. – Vol. 2, Issue 1. – P. 1–15.

11. Paxson V., Floyd S. Wide-Area Traffic: The Failure of Poisson Modeling // Proc. ACM Sigcomm, London, UK, 1994. – P. 257–268.

12. Long-Range Dependence in Variable-Bit-Rate Video Traffic / J. Beran, R. Sherman, M.S. Taqqu [et al.] // IEEE Trans. Commun. – 1995. – Vol. 43. – P. 1566–1579.

13. The Statistical End-to-end Delay Guarantee for Networks with Self-similar Traffic: Technical Report [JNG10-02] / Department of Computer Science, Hong Kong Baptist University; manager Joseph K. Ng; contractors: Shibin Song, Bihai Tang, Wei Zhao. – Hong Kong, 2003. – 25 p.

14. Park K., Willinger W. Self-Similar Network Traffic and Performance Evaluation. – New York: Wiley, 2000. – 576 p.

15. Агеев Д.В., Самир Махмуд, Чернятьев А.В. Выбор пропускных способностей каналов связи при самоподобной характере передаваемых потоков // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2007. – Вып. 148. – С. 87–95.

16. Крылов В.В., Самохвалова С.С. Теория телетрафика и ее приложения. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 288 с.

17. Агеев Д.В., Евлаш Д.В., Самир Махмуд Параметрический синтез телекоммуникационных систем при самоподобном входящем потоке // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2007. – Вып. 151 – С. 124–128.

18. Bashforth B.N., Williamson C. Statistical Multiplexing of Self-Similar Video Streams: Simulation Study and Performance Results // Proceedings of the 6th International Symposium on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems (MASCOTS'98), 1998. – P. 119–26.

19. Elwalid A., Mitra D., Wentworth R. A New Approach for Allocating Buffers and Bandwidth to Heterogeneous, Regulated Traffic in an ATM Node // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 1995. – Vol. 13, Issue 6. – P. 1115–1127.

20. Predicting Quality of Service for Traffic with Long Range Dependence / N. Duffield, J. Lewis, N. O'Connell [et al.] // Proceedings of ICC'95. – Seattle, 1995. – P. 473–477.

21. Mayor G., Silvester J. Time Scale Analysis of an ATM Queueing System With Long-Range Dependent Traffic // Proceedings of the INFOCOM '97. Sixteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Driving the Information Revolution. – 1997. – Vol. 1. – P. 205–212.

22. Клейнрок Л. Теория массового обслуживания. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.

23. Агеев Д.В., Самир Махмуд Сравнительный анализ методик выбора пропускных способностей каналов связи при самоподобных потоках в сети // Зв'язок. – 2007. – № 3. – С. 15–17.

24. Ageyev D.V., Samir Mahmoud The Characterization Of Traffic In Communications Links Under Input Stream With The Self-Similarity Effect // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2008. – №1(31). – С. 27–29.

25. Агеев Д.В., Евлаш Д.В. Параметрический синтез мультисервисной сети минимальной стоимости при самоподобном входящем потоке и заданными параметрами качества обслуживания / Д.В. Агеев // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2008. – Вып. 155 – С. 105–110.

26. Агеев Д.В., Евлаш Д.В. Расчет параметров самоподобных информационных потоков, передающихся по каналам связи мультисервисной сети, при предоставлении услуг «Triple Play» // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». – 2009. – №645. – С. 131–141.