

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ НАЛОЖЕННЫХ СЕТЕЙ С САМОПОДОБНЫМ ТРАФИКОМ

Введение

Развитие области телекоммуникаций идет в направлении перехода к мультисервисным телекоммуникационным системам, построенным согласно концепции NGN (Next Generation Network), которые на текущий момент наиболее перспективны. Наблюдается опережение развития технических средств относительно развития методов проектирования, которое является одной из актуальных проблем телекоммуникаций. Этап проектирования играет значительную роль в процессе создания любой технической системы. Именно на этом этапе закладываются ее характеристики, тем самым определяется эффективность ее функционирования. Таким образом, от эффективности используемых методов синтеза, от адекватности математических моделей, на которых эти методы базируются, зависят свойства и жизнеспособность будущей системы.

Современные инфокоммуникационные сети являются большими сложными системами, которые имеют многоуровневую структуру во многих аспектах рассмотрения. Особого внимания заслуживает структура, образованная наложенными сетями. Такое многоуровневое, многоаспектное описание существующих инфокоммуникационных и телекоммуникационных сетей трудно поддается математическому моделированию без потери наглядности или адекватности. Одной из самых удачных моделей является модель в виде многослойного графа. Использование данной модели позволяет адекватно описывать топологию каждой из наложенных сетей и взаимосвязь между процессами, происходящими на разных ее уровнях, а также представлять телекоммуникационную систему на этапе ее проектирования как единый целостный объект.

Подходы, используемые на современном этапе решения задач параметрического синтеза, базируются на моделировании трафика в сети, как простейший поток. В то же время, результаты исследований как зарубежных, так и украинских ученых показали, что потоки в мультисервисных сетях имеют совершенно другую структуру, отличную от принятой и широко используемой в классической теории телетрафика. Игнорирование этого факта во время проектирования и использование в проводимых расчетах моделей классической теории телетрафика значительно влияет на результаты проектирования, что вызывает необходимость в значительной коррекции методов синтеза.

В статье проведен обзор существующих методов, используемых при структурном и параметрическом синтезе современных инфокоммуникационных систем, а также предложен подход, позволяющий учесть влияние стека протоколов при синтезе этих систем.

Способ учета наложенных сетей при структурном синтезе

Формально, процесс проектирования структуры телекоммуникационной системы следует рассматривать как решение совокупности двух основных задач: задачи выбора структуры (структурного синтеза) и выбора числовых значений параметров заданной структуры, удовлетворяющих совокупности условий (параметрический синтез).

Одной из самых удачных моделей, описывающих наложенный принцип современных инфокоммуникационных сетей, является модель в виде многослойного графа [1]. Использование данной модели позволяет адекватно описывать топологию каждой из наложенных сетей и взаимосвязь между процессами, происходящими на разных ее уровнях, а также представлять телекоммуникационную систему на этапе ее проектирования как единый целостный объект.

Телекоммуникационная система, содержащая наложенные сети, описывается с помощью многослойного графа $MLG = (\Gamma, V, E)$, который включает в свой состав подграфы $\Gamma^l = (V^l, E^l)$. Подграф Γ^l описывает структуру сети на уровне l . Подграф $\Gamma^0 = (V^0, E^0)$ содержит вершины и ребра, которые обеспечивают связь подграфов Γ^l между собой. Таким образом, можно записать: $\Gamma = \bigcap_{l=0} \Gamma^l$.

На структуру графа $MLG = (\Gamma, V, E)$ накладывается дополнительное ограничение, которое заключается в том, что для каждого ребра $e^l = (i, j)^l$, $e^l \in E^l$ подграфа Γ^l существует путь $\pi = (v_i^l, \dots, v_j^l)$ между вершинами v_i^l и v_j^l , $v_i^l, v_j^l \in V^l$, проходящий через подграф более низкого уровня: $\exists v_m^n \in \pi$, $v_m^n \in V^n$, $n < l$. Данное правило не выполняется только для подграфа самого нижнего уровня, $l = 1$.

Подход, базирующийся на использовании при решении задач структурно-параметрического синтеза современных сетей, имеющих в своем составе наложенные сети, моделей, представленных в виде многослойного графа, был применен для решения ряда задач. Так, в работе [2] решена задача синтеза оптической телекоммуникационной сети с оптическими конверторами за счет использования модели многослойного графа с представлением оптической сети как совокупности графов. С использованием аналогичного подхода в [3] предложен метод решения задачи структурно-параметрического синтеза мультисервисной телекоммуникационной сети содержащей в своем составе IP-сеть, наложенную на сеть MPLS, которая в свою очередь была наложенной на сеть WDM. Использование модели в виде многослойного графа позволило представить синтезируемые мультисервисные телекоммуникационные системы как единый целостный объект и решить задачу одновременного синтеза каждой из наложенных сетей, что повысило, как показали исследования, эффективность решения задачи синтеза по экономическим и техническим показателям.

Применение моделей самоподобных процессов для синтеза инфокоммуникационных систем

Проведенные исследования мультисервисного трафика [4, 5] показали несоответствие моделей классической теории телетрафика реальным свойствам трафика, что оказывает существенное влияние на процесс проектирования инфокоммуникационных сетей и управление трафиком в них. На данный момент наиболее корректными моделями считаются модели самоподобных процессов.

Разработка методов параметрического синтеза инфокоммуникационных сетей, базирующихся на моделях самоподобного трафика, требует предварительного решения частных задач [6]:

- выбор моделей трафика для различных участков сети;
- разработка методов определения параметров агрегированного трафика;
- метод оценки качества обслуживания в условиях самоподобного трафика.

В работе [6] при решении задач параметрического синтеза телекоммуникационных систем выделяются два вида потоков:

- индивидуальные, поступающие от отдельных источников;
- групповые, являющиеся результатами объединения (агрегирования) индивидуальных потоков.

Характеристики потока, поступающего от индивидуального источника, хорошо описываются моделью On/Off источника [7], который имеет два состояния: активное (On-период) и пассивное (Off-период) (рис. 1, а). В активном состоянии он выдает поток с постоянной

скоростью λ_{On} . В пассивном состоянии трафик не передается (рис. 1, б). Длительности периодов On и Off являются случайными величинами и могут описываться распределением с тяжелым хвостом.

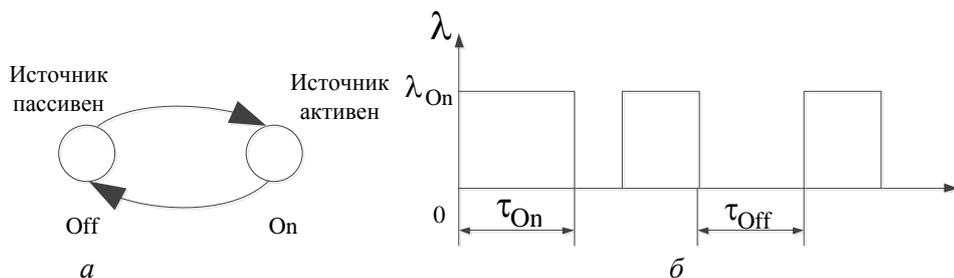


Рис. 1. Модель индивидуального источника трафика

Групповой трафик в каналах связи сети [8] можно описать моделью фрактального броуновского трафика (рис. 1, б) как $\xi(t) = \lambda t + \sqrt{\zeta \lambda} B_H(t)$, где $\xi(t)$ интерпретируется как объем данных, поступивший в интервале $(0, t]$.

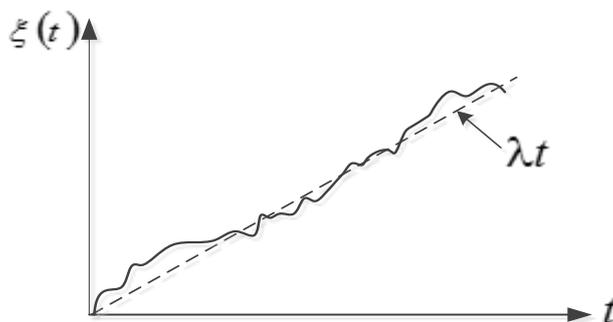


Рис. 2. Модель группового трафика

Комбинация параметров $\{\lambda, \zeta, H\}$ в полной мере описывает модель группового трафика, так как любые два групповых трафика, имеющих одинаковые значения параметров $\{\lambda, \zeta, H\}$, имеют одинаковые характеристики качества обслуживания.

В направлении решения второй задачи – определение параметров агрегированного трафика – можно отметить следующие работы.

В основу методики определения параметров агрегированного трафика по известным параметрам индивидуальных потоков можно положить известный результат, что суперпозиция большого количества потоков, описываемых моделью On/Off источника, можно описать моделью фрактального броуновского движения. Доказательство, что трафик, агрегированный от On/Off источников, асимптотически стремится к броуновскому (или фрактальному Броуновскому) движением приведено в работе [8]. Кроме этого, в данной работе получены выражения, которые могут быть использованы для определения параметров результирующего трафика.

Рассмотрим случай агрегирования однотипных потоков, когда функции распределения длительностей On периодов для всех потоков функции распределения для длительностей Off периодов совпадают.

Теорема 1.

Для больших N и T агрегированный кумулятивный процесс $\xi_N(Tt), t \geq 0$, образуемый при объединении N On/Off источников, ведет себя статистически как

$$\xi_N(Tt) \stackrel{d}{=} TN \frac{\bar{\tau}_{On}}{\bar{\tau}_{On} + \bar{\tau}_{Off}} t + T^H \sqrt{L(T)N} \sigma_{\lim} B_H(t), \quad (1)$$

где $H = (3 - \alpha_{\min})/2$ и σ_{\lim} определяется как, описано ниже.

Для определения параметра σ_{lim} введем следующие обозначения. Когда $1 < \alpha_j < 2$, примем $a_j = l_j (\Gamma(2 - \alpha_j)) / (\alpha_j - 1)$. Когда $\sigma_j^2 < \infty$ примем $\alpha_j = 2$, $L_j(\tau) \equiv 1$ и $a_j = \sigma_j^2 / 2$. Здесь и далее под индексом j понимается параметр, относящийся к On или Off периоду. Нормирующие коэффициенты и ограничивающие константы выбираются в зависимости от значения следующего параметра

$$b = \lim_{t \rightarrow \infty} t^{\alpha_{\text{Off}} - \alpha_{\text{On}}} \frac{L_{\text{On}}(t)}{L_{\text{Off}}(t)}. \quad (2)$$

Если $0 < b < \infty$ (подразумевается, что $\alpha_{\text{On}} = \alpha_{\text{Off}}$ и $b = \lim_{t \rightarrow \infty} L_{\text{On}}(t) / L_{\text{Off}}(t)$), примем $\alpha = \alpha_{\text{On}} = \alpha_{\text{Off}}$, тогда

$$\sigma_{\text{lim}}^2 = \frac{2(\bar{\tau}_{\text{Off}}^2 a_{\text{On}} b + \bar{\tau}_{\text{On}}^2 a_{\text{Off}})}{(\bar{\tau}_{\text{On}} + \bar{\tau}_{\text{Off}})^3 \Gamma(4 - \alpha)}, \quad (3)$$

$$L(t) = L_{\text{Off}}(t); \quad (4)$$

если $b = 0$:

$$\sigma_{\text{lim}}^2 = \frac{2\bar{\tau}_{\text{On}}^2 a_{\text{Off}}}{(\bar{\tau}_{\text{On}} + \bar{\tau}_{\text{Off}})^3 \Gamma(4 - \alpha_{\text{Off}})}, \quad (5)$$

$$L(t) = L_{\text{Off}}(t); \quad (6)$$

При $b = \infty$:

$$\sigma_{\text{lim}}^2 = \frac{2\bar{\tau}_{\text{Off}}^2 a_{\text{On}}}{(\bar{\tau}_{\text{On}} + \bar{\tau}_{\text{Off}})^3 \Gamma(4 - \alpha_{\text{On}})}. \quad (7)$$

$$L(t) = L_{\text{On}}(t). \quad (8)$$

В частном случае, когда $\alpha_{\text{On}} = \alpha_{\text{Off}} = 2$, то есть длительность On и Off периодов имеют конечные дисперсии, то $H = 1/2$, фрактальное броуновское движение $B_H(t)$ вырождается в классическое броуновское движение $B(t)$, $L(t) = 1$ и дисперсия в этом случае

$$\sigma_{\text{lim}} = \sqrt{\frac{\bar{\tau}_{\text{Off}}^2 \sigma_{\text{On}}^2 + \bar{\tau}_{\text{On}}^2 \sigma_{\text{Off}}^2}{(\bar{\tau}_{\text{On}} + \bar{\tau}_{\text{Off}})^3}}. \quad (9)$$

Рассмотрим случай разнородных источников. Примем, что мы имеем N' типов источников в пропорциях N_i / N , $i = 1, \dots, N'$, таких что N_i / N не стремится к нулю, когда $N \rightarrow \infty$. Обозначим как $P_{\text{On}}^{(i)}(\tau)$, $P_{\text{Off}}^{(i)}(\tau)$, $\alpha^{(i)}$, $\sigma_{\text{lim}}^{(i)}$, $L^{(i)}(t)$ – характеристики соответствующих типов источников.

Теорема 2.

Для больших $N_i, i = 1, \dots, N'$ и большого T агрегированный кумулятивный процесс $\xi(Tt), t \geq 0$, образуемый при объединении On/Off источников, ведет себя статистически как

$$\xi(Tt) \stackrel{d}{=} T \left(\sum_{i=1}^{N'} N_i \frac{\bar{\tau}_{On}^{(i)}}{\bar{\tau}_{On}^{(i)} + \bar{\tau}_{Off}^{(i)}} \right) t + \sum_{i=1}^{N'} T H^{(i)} \sqrt{L^{(i)}(T) N_i} \sigma_{\lim}^{(i)} B_{H^{(i)}}(t), \quad (10)$$

где $H^{(i)} = (3 - \alpha_{\min}^{(i)})/2$ и $B_{H^{(i)}}(t)$ – независимое фрактальное броуновское движение.

Таким образом, полученные расчетные выражения могут использоваться для определения параметров групповых потоков, передаваемых по каналам связи мультисервисной телекоммуникационной системы, по известным характеристикам потоков отдельных абонентов. Так, например, при нахождении характеристик агрегированного потока от группы однотипных источников можно воспользоваться выражением (1), а в случае различных по характеристикам источников – выражением (10). Необходимое для справедливости приведенных здесь выражений условие при большом значении времени наблюдения и большом количестве источников обычно выполняется при проектировании мультисервисных телекоммуникационных систем на участках агрегации доступа, агрегации сервисов и транспортной сети. В то же время на таких участках узлы доступа допущение о большом количестве источников не выполняется и требует проведения дополнительных исследований и применения других методик.

В направлении определения параметров агрегирования групповых потоков представляют интерес данные об параметрах агрегированного трафика, а также как изменяются его параметры в результате обработки в узлах.

Среди работ, посвященных исследованию свойств агрегированного самоподобного трафика как на базе реальных сетей так и их математических моделей, следует отметить [9, 10], где с использованием аналитических моделей самоподобных процессов приведены и доказаны утверждения, из которых следует, что в случае агрегирования потоков от нескольких источников, если хотя бы один из них обладает свойствами самоподобия, свойствами самоподобия будет обладать и результирующий суммарный поток. Самоподобие также сохраняется при объединении потоков и от однородных, и от разнородных источников трафика.

Исследования, проводимые в работе [11], показали, что в результате ожидания в очереди для любой дисциплины обслуживания свойства самоподобия для строго асимптотически самоподобного трафика не изменяются, если процесс, описывающий изменение длины очереди, имеет конечный второй момент.

В направлении оценки параметров качества обслуживания трафика в сети можно отметить следующие работы.

Норрос в серии работ [12, 13], применяя для группового трафика модель фрактального броуновского трафика и используя модель узла сети как систему с накопителем, получил выражения, связывающие вероятность потерь, требуемую пропускную способность канала связи, среднюю длину очереди, объем буфера. В этой модели, являвшейся моделью непрерывного времени, не рассматривается обработка отдельного пакета. Указанная модель применима для определения параметров качества обслуживания трафика в узле для сетей, обеспечивающих передачу большого количества потоков.

Среди работ, посвященных задачам параметрического синтеза телекоммуникационных сетей в условиях передачи самоподобных трафиков, следует отметить статьи [6, 14], в которых на базе известных ранее результатов предложена система математических моделей трафиков и методов синтеза современных телекоммуникационных систем.

Методы параметрического синтеза мультисервисных наложенных телекоммуникационных сетей с применением математической модели многослойного графа

Приведенные выше результаты применимы для случая однослойных сетей, которые не учитывают наложенной структуры современных сетей и не учитывают, что тип протокольного блока изменяется при передаче через сеть. Так, например, если источник трафика отправляет протокольный блок в виде последовательности пакетов, то считалось, что при дальнейшей передаче его через сеть он агрегируется в групповой поток и, пройдя по маршруту через телекоммуникационную сеть, доставляется узлу-получателю. При таком рассмотрении не учитывались процессы, параллельно происходящие на других уровнях (слоях) мультисервисной телекоммуникационной сети, такие как установка соединения, оказание информационной услуги сервером и другие, в целях которых производилась передача указанной последовательности пакетов.

Для устранения данного несоответствия, базируясь на модели [15], автором предлагается использовать при моделировании источников трафика в мультисервисных наложенных телекоммуникационных системах следующую модель (рис. 3). Предлагаемая для моделирования источника трафика в мультисервисных наложенных сетях модель представляет собой многоуровневый On/Off –источник.

В этом случае параметры потока в состоянии активности для наложенной сети на уровне l могут быть рекуррентно определены через параметры смежных слоев:

$$\lambda_l = P_{\text{Off}}^l \lambda_{\min} + P_{\text{On}}^l \lambda_{l-1}, \quad (11)$$

$$\sigma_l^2 = P_{\text{Off}}^l (\lambda_{\min})^2 + P_{\text{On}}^l (\lambda_{l-1})^2 - (\lambda_l), \quad (12)$$

где λ_l и λ_{l-1} – интенсивности потока на уровне l и $l-1$ соответственно; P_{Off}^l , P_{On}^l – вероятности нахождения источника в активном и пассивном состоянии соответственно; σ_l^2 – дисперсия потока на уровне l .

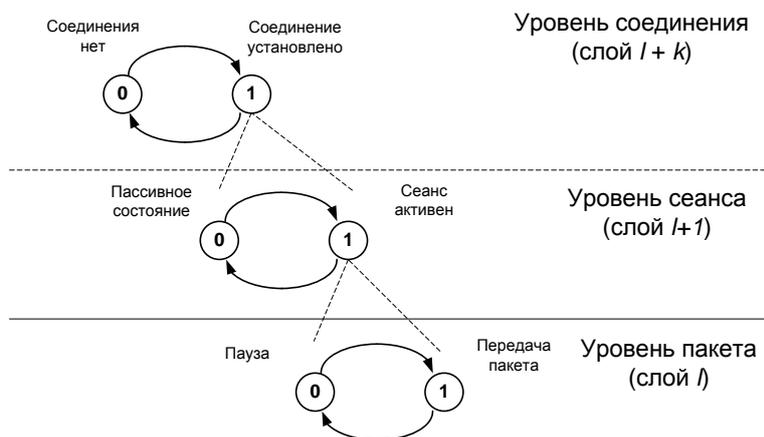


Рис. 3. Модель многоуровневого источника потока

Таким образом, применение предложенной модели многослойного источника позволяет оценивать параметры потока от индивидуальных источников на разных уровнях наложенной сети (пакетная сеть, транспортная сеть, уровень предоставления услуг).

При решении задач параметрического синтеза наложенных телекоммуникационных сетей необходимо определять параметры структурных элементов на различных ее уровнях. Для решения данной задачи рекомендуется использовать следующую методику:

1. Синтезируемая мультисервисная наложенная сеть описывается многослойным графом согласно приведенной во втором разделе методики.

2. Используя данные об абонентах, подключаемых к сети, и перечне потребляемых ими телекоммуникационных услуг, определяют параметры потоков, создаваемых ими на каждом из уровней наложенной сети. Для решения данной задачи применяется описанная выше многоуровневая модель источника. Параметры модели On/Off – источника, используемого для описания телекоммуникационной услуги, потребляемой абонентов зависят от ее вида и ее характеристик на соответствующей уровне наложенной сети.

3. Потоки, поступающие от индивидуальных источников, агрегируются и определяются параметры группового трафика с использованием расчетных выражений (1) – (10).

4. Для полученной структуры сети решается задача распределения потоков с использованием потоковой модели для многослойного графа [16]. При применении потоковой модели следует использовать ее свойство сохранения справедливости законов сохранения потоков в пределах слоя вдоль пути и в вершинах графа, которые совпадают с условиями для классического графа, а также закона сохранения потока в вершине графа с учетом потоков протекающих между слоями многослойного графа

$$\sum_{z,z>l} \left(\sum_{n,e_{ni}^{zl} \in E} \gamma_{ni}^{zl} \right) + \sum_{m,m<l} \left(\sum_{n,e_{in}^{lm} \in E} \gamma_{in}^{lm} \right) + \sum_{j,e_{ij}^l \in E^l} \gamma_{ij}^l = 2(\mathfrak{G}_i^{l+} - \mathfrak{G}_i^{l-}), \quad \forall v_i^l \in V^l. \quad (13)$$

где γ_{ni}^{zl} – поток, протекающий по ребру $e_{ni}^{zl} = (v_n^z, v_i^l)$, соединяющему вершины $v_i^l \in V^l$ и $v_n^z \in V^z$ графов слоев l и z соответственно; γ_{ij}^l – поток заданной величины, протекающий по ребру $e_{ij}^l = (v_i^l, v_j^l)$ графа Γ^l ; $\mathfrak{G}_i^{l+}, \mathfrak{G}_i^{l-}$ – суммарная величина потоков, возникающих в вершине v_i^l и суммарная величина потоков, для которых вершина v_i^l является потребителем, соответственно.

Использование выражений, описывающих законы сохранения потоков для многослойного графа для значений интенсивностей потоков λ , описываемых моделями самоподобного трафика. В результате выполнения данного шага получим выражения для суммируемых потоков в ребрах многослойного графа.

5. С использованием расчетных выражений [7]

$$H = \max_i (H_i), \quad i = 1, \dots, N. \quad (14)$$

$$\lambda = \sum_i \lambda_i \quad (15)$$

$$\varsigma = \frac{\sum_i \varsigma_i \lambda_i}{\sum_i \lambda_i} \quad (16)$$

и полученных выражений на шаге 4, формируются выражения для определения параметров агрегированных потоков, образуемых при объединении потока протекающих по ребрам многослойного графа.

6. Найденные на предыдущем шаге выражения используются в расчетных выражениях для параметров качества обслуживания для соответствующих ребер многослойного графа [14].

7. Полученные в результате выполнения описанных выше шагов выражения используются при математической постановке оптимизационной задачи, решение которой позволяет определить параметры, приписанные ребрам многослойного графа, и как результат – значения параметров структурных элементов мультисервисной наложенной телекоммуникационной сети.

Выводы

При синтезе мультисервисных телекоммуникационных сетей одной из задач является обеспечение требуемого качества обслуживания, которое достигается за счет эффективного параметрического синтеза. Методы параметрического синтеза, базирующиеся на линейных и нелинейных моделях, должны учитывать наличие функциональных и вероятностных зависимостей между параметрами передаваемых потоков и параметрами качества обслуживания.

Для разработки методики анализа и синтеза мультисервисных сетей в качестве математических моделей потоков на различных уровнях и участках мультисервисной наложенной телекоммуникационной сети использованы модели самоподобных процессов. Указанные модели позволяют учитывать 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.

Предложенная модель, базирующаяся на модели в виде многослойного графа и самоподобных потоках, позволяет учитывать различный тип передаваемых единиц данных на различных уровнях наложенных сетей. Это позволит повысить эффективность и точность методов анализа и синтеза наложенных телекоммуникационных сетей.

Список литературы: 1. *Агеев Д.В.* Моделирование современных телекоммуникационных систем многослойными графами [Электронный ресурс] / Д.В. Агеев // Проблемы телекоммуникаций. – 2010. – № 1(1) – Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua/2010/1/1/101_ageyev_simulation.pdf. 2. *Агеев Д.В.* Структурный синтез сети WDM с оптическими конверторами с применением модели, представленной в виде многослойного графа / Д.В. Агеев, Хайдара Абдалла // Проблемы телекоммуникаций. – 2012. – №2(7). – С. 3–17. – Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua/2012/2/1/122_ageyev_mlg.pdf. 3. *Агеев Д.В.* Структурный и параметрический синтез наложенной сети IP/MPLS поверх сети WDM с применением модели, представленной в виде многослойного графа [Электронный ресурс] / Д.В. Агеев // Проблемы телекоммуникаций. – 2012. – № 3 (8). – С. 3 – 23. – Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua/2012/3/1/123_ageyev_mpls.pdf. 4. *Leland W.E.* On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic (Extended Version) / W.E. Leland, M.S. Taqqu, W. Willinger, D.V. Wilson // IEEE/ACM Trans, on Networking. – 1994. – Vol. 2, Issue 1. – P. 1-15. 5. *Paxson V.* Wide-Area Traffic: The Failure of Poisson Modeling / V. Paxson, S. Floyd // Proc. ACM Sigcomm, London, UK. – 1994. – С. 257-268. 6. *Ryu B.* Point process models for self-similar network traffic, with applications / B. Ryu, S. Lowen // Stochastic Models. – 1998. – № 14(3). – P. 735-761. 7. *Агеев Д.В.* Методика определения параметров потоков на разных участках мультисервисной телекоммуникационной сети с учетом эффекта самоподобия [Электронный ресурс] / Д.В. Агеев, А.А. Игнатенко, А.Н. Копылев // Проблемы телекоммуникаций. – 2011. – № 3 (5). – С. 18 – 37. – Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua/2011/3/1/113_ageyev_method.pdf. 8. *Pruthi P.* Heavy-tailed on/off source behavior and self-similar traffic / P. Pruthi, A. Erramilli // Proceedings IEEE Int. Conf. Commun. ICC '95. – Seattle, WA, 1995. – P. 445–450. 9. *Taqqu M.S.* Proof of a Fundamental Result in Self-Similar Traffic Modeling / M.S. Taqqu, W. Willinger, R. Sherman // SIGCOMM Comput. Commun. Rev. – 1997. – Vol. 27, Issue 2. – P. 5-23. 10. *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. 11. *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. 12. *Norros I.* A Storage Model with Self-Similar Input / I. Norros // Queueing Systems. – 1994. – Vol. 16, No 3-4. – P. 387-396. 13. *Norros I.* On the use of fractional Brownian motion in the theory of connectionless networks / I. Norros // Selected Areas in Communications, IEEE Journal. – 1995. – Vol. 13, Issue 6. – P. 953-962. 14. *Агеев Д.В.* Параметрический синтез мультисервисных телекоммуникационных систем при передаче группового трафика с эффектом самоподобия [Электронный ресурс] / Д.В. Агеев // Проблемы телекоммуникаций. – 2013. – № 1 (10). – С. 46 – 65. – Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua/2013/1/1/131_ageyev_fbm.pdf. 15. *Агеев Д.В.* Метод проектирования телекоммуникационных систем с использованием потоковой модели для многослойного графа [Электронный ресурс] / Д.В. Агеев // Проблемы телекоммуникаций. – 2010. – № 2 (2). – С. 7 – 22. – Режим доступа: http://pt.journal.kh.ua/2010/2/2/102_ageyev_layer.pdf.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 15.12.2015