

**СВОЙСТВА ФРАКТАЛЬНОГО ТРАФИКА ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ СИСТЕМЫ
МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ С ОЧЕРЕДЬЮ**Н. Г. Треногин¹, М. Н. Петров^{2*}, Д. Е. Соколов¹¹Макрорегиональный филиал «Сибирь» ПАО «Ростелеком»
Российская Федерация, 630099, г. Новосибирск, ул. М. Горького, 53²Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

*E-mail: ettk@bk.ru

Изложены результаты исследования свойств потока событий, являющегося моделью сетевого трафика с фрактальными (самоподобными) свойствами, после прохождения обработки в системе массового обслуживания с очередью. В качестве базовой модели такого трафика используется фрактальный дробовой процесс (FSNDP), для которого ранее было установлено соответствие важнейших статистических характеристик реальному трафику в распределенных информационных системах. Посредством имитационного моделирования установлено, что выходной поток также обладает свойствами самоподобия, при этом степень выраженности самоподобных свойств возрастает с ростом загрузки системы. Также подтверждено, что выявленные зависимости являются общими для входного потока с различной степенью самоподобных свойств, причем при высокой загрузке системы массового обслуживания влияние степени самоподобия входного потока на свойства выходного потока нивелируется. Приведено объяснение явления нарастания фрактальности с ростом загрузки за счет срезания пиков трафика при полной загрузке канала. Полученные результаты предлагается рассматривать как базу для разработки тензорных моделей сетей массового обслуживания (СМО) с фрактальными потоками нагрузки.

Ключевые слова: фрактальный трафик, фрактальный дробовой процесс, FSNDP, СМО, имитационное моделирование.

Sibirskii Gosudarstvennyi Aerokosmicheskii Universitet
imeni Akademika M. F. Reshetneva. Vestnik
Vol. 18, No. 1, P. 105–110**PROPERTIES OF FRACTAL TRAFFIC ON THE OUTPUT OF A QUEUING SYSTEM**N. G. Trenogin¹, M. N. Petrov^{2*}, D. E. Sokolov¹¹Macroregional branch “Siber” of PJSC “Rostelecom”
53, M. Gorky St., Novosibirsk, 630099, Russian Federation²Reshetnev Siberian State Aerospace University
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

*E-mail: ettk@bk.ru

The article presents the results of a study of the event flow properties, which is a model of network traffic with fractal (self-similar) properties after processing in a queuing system. The base model of the traffic uses fractal shot-noise driven Poisson process (FSNDP). Definitions and the most common statistical properties of common fractal (self-similar) processes and FSNDP model are described in terms of measurable network traffic characteristics. Previously the authors proved matching the most important statistical characteristics of real traffic in distributed information systems to this model process. Through simulation it is determined that the output stream also shows the properties of self-similarity, and the degree of self-similar properties increases with increasing system utilization rate. It is also confirmed that the dependences identified are common to the input stream with different degree of self-similar properties, and degree of self-similarity of the input stream to the output stream properties is leveled for high-load queuing systems, while systems with low load rate demonstrate insignificant rise of fractal properties such as Hurst factor comparing to input event stream. Rising of fractal properties with increasing load is explained basing on application phenomenon of peak values cut-off in times of maximum load. Numerical parameters of the model simulated are based on previously performed statistical analysis of dumped network traffic of real client-server data processing application in a telecom operator WAN network. The results have been suggested as the basis for the development of tensor models of queuing networks with fractal load, and future study of analytical expressions for queuing networks fed by fractal load streams.

Keywords: fractal traffic, fractal shot-noise driven Poisson, FSNDP, queuing system, simulation.

Введение. В последние годы для математического моделирования трафика пакетных сетей передачи данных все чаще используются фрактальные стохастические процессы [1–4]. Фрактальные потоки, являясь развитием классических моделей теории телетрафика, учитывают такие свойства нагрузки, выявленные в современных высокоскоростных сетях, как склонность к всплескам, наличие внутренней корреляции и последствия, медленное сглаживание характеристик при рассмотрении в укрупненном временном масштабе.

В настоящей статье рассматриваются статистические характеристики фрактального потока после обработки в системе массового обслуживания с очередью, т. е. в общем случае, на произвольном участке сети массового обслуживания. Показано, что после прохождения системы с очередью фрактальные свойства сохраняются, причем степень выраженности этих свойств зависит от степени загрузки системы.

Основные понятия фрактальных моделей трафика. Понятие фрактальных (fractal), или самоподобных (self-similar), случайных процессов опирается на геометрическое понятие фрактала – объекта, в котором часть некоторым образом подобна целому. Аналогичным образом, случайный процесс $X(t)$ является самоподобным с параметром Херста H , если $X(t)$ и $a^{-H}X(at)$ имеют идентичные конечномерные распределения вероятностей для всех $a > 0$, т. е. процесс существенно не меняет вида при масштабировании по шкале времени – часть траектории процесса, как во фрактале, подобна целому, но не геометрически, а статистически. Параметр Херста H может принимать значения из интервала $[0,5; 1)$, значение 0,5 означает полное отсутствие фрактальных свойств, рост H в сторону 1 – усиление выраженности самоподобного характера. Исчерпывающий обзор подходов к определению фрактальных моделей приведен в работе [4].

В зависимости от особенностей предметной области и целей моделирования, для описания трафика используются различные классы случайных процессов, в том или ином отношении обладающие фрактальными свойствами. Так, в качестве модели трафика магистральных каналов, агрегирующих потоки от значительного числа источников, могут применяться модели фрактального броуновского движения [5] или α -устойчивые процессы [6], общей характеристикой которых является определение процесса как последовательности отсчетов $\{x_i\}$, соответствующих количеству пакетов или байтов в потоке на последовательных единичных интервалах времени. Для описания поведения сети на уровне пропуска отдельных пакетов разработан класс точечных фрактальных процессов, траектория которых представляет собой последовательность $\{t_i\}$ моментов поступления очередного пакета. Хорошо проработан аппарат фрактальных On–Off процессов, рассматриваемых как чередование периодов активности и пауз, длительности которых обладают самоподобными свойствами, либо как суперпозиция нескольких таких последовательностей. Также предложены модели, опирающиеся не на кон-

кретные модели потоков, а на их универсальные статистические характеристики [7].

Модель трафика на основе фрактального дробового процесса (FSNDP). В результате исследования реальных срезов Ethernet-трафика в действующих информационных системах автоматизации бизнес-процессов оператора связи авторами ранее было показано [8], что в качестве адекватной модели потока пакетов в распределенной системе обработки данных с вынесенными рабочими местами может использоваться один из фрактальных точечных процессов, а именно, фрактальный дробовой процесс, также называемый процессом FSNDP (Fractal Shot Noise Driven Poisson) [6; 7]. Для этого процесса существуют подходы к статистической оценке параметров по полученным дампам реального трафика, он также поддается корректной и вычислительно умеренно трудоемкой генерации по заданным параметрам [4–15].

Переменная во времени интенсивность процесса FSNDP задается непрерывным случайным процессом – фрактальным дробовым шумом, который получается путем фильтрации классического пуассоновского процесса.

Процесс FSNDP полностью определяется набором из пяти параметров (μ , β , K , A , B), имеющих следующий смысл.

Первичный пуассоновский поток $\{t_i\}$ с постоянной интенсивностью μ служит входом для линейного фильтра с импульсной функцией

$$h(t) = \begin{cases} Kt^{-\beta}, t \in (A, B) \\ 0, t \notin (A, B), \end{cases} \quad (1)$$

где β определяется степенью самоподобия процесса; A , B – неотрицательные ограничивающие параметры; K – положительная константа, определяющая амплитуду результирующего процесса. Фильтр порождает фрактальный дробовой шум

$$I(t) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} h(t-t_i), \quad (2)$$

рассматриваемый как переменная интенсивность для второго пуассоновского точечного процесса, выходом которого является поток FSNDP (рис. 1).

Параметр β определяется степенью самоподобия процесса и связан с параметром Херста H :

$$H = 3/2 - \beta. \quad (3)$$

Процесс обладает устойчиво самоподобными свойствами при условии $A \ll B$ и A , достаточно близком к нулю. В практических моделях обычно принимается, что $A = 0$ или $A = 10^{-7}$.

Поток на выходе системы FSNDP/D/1. Результаты имитационного моделирования показывают, что последовательность событий, соответствующая моментам завершения обработки заявок в однолинейной системе массового обслуживания (СМО) с очередью и потоком FSNDP на входе, т. е. поток на выходе СМО после обработки, сохраняет фрактальные свойства.

На рис. 2 приведена зависимость средней длины очереди $q(\rho)$ в зависимости от загрузки системы ρ для искусственно сгенерированных срезов потока FSNDP, параметры которых отражены в таблице. Параметры срезов потока выбраны, исходя из роста параметра Херста H : 0,55 соответствует незначительному проявлению фрактальных свойств, при $H = 0,6$ и далее 0,7 фрактальные свойства уже более существенно выражены. Соотношение (3) позволяет пред-

смотреть значение H при генерировании среза потока, задавая показатель β . Однако так как данный показатель влияет также на итоговую интенсивность λ (соотношения для статистических характеристик фрактального дробового процесса приведены в [7]), для получения сопоставимых по интенсивности срезов помимо β варьировался коэффициент K .

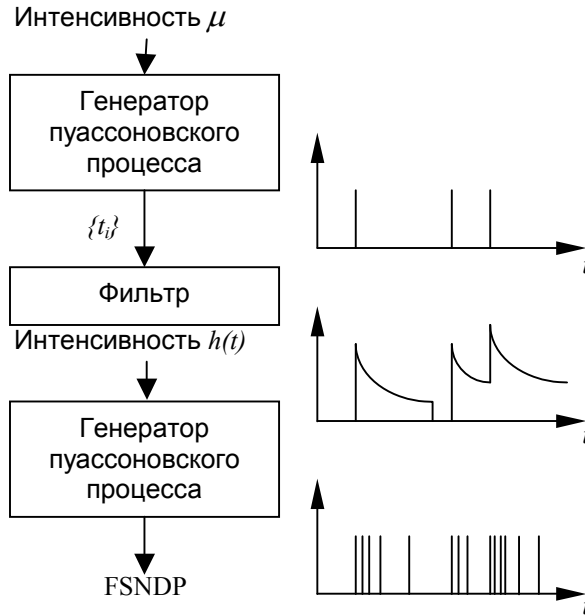


Рис. 1. Составляющие процесса FSNDP

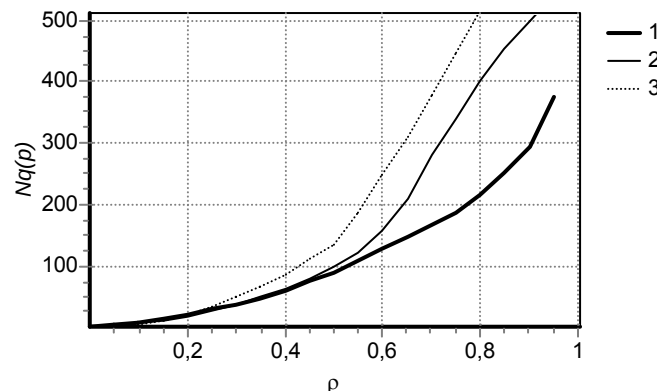


Рис. 2. Оценка длины очереди в СМО FSNDP/D/1 в зависимости от загрузки системы при возрастании степени самоподобия: $H = 0,55, 0,6$ и $0,7$

Параметры срезов потока

	1	2	3
Длительность, с	1000	1000	1000
μ	0,025	0,025	0,025
K	10	20	40
β	0,95	0,9	0,8
A	0	0	0
B	100	100	100
Параметр Херста H	0,55	0,6	0,7
Средний объем пакета, байт	100	100	100

Ранее было установлено [8], что реальному сетевому трафику в моделях FSNDP наиболее соответствует модель с постоянным временем обслуживания (что в терминах предметной области означает постоянный объем пакета). По аналогии с классической теорией массового обслуживания, основанной на марковских потоках, исследуемую СМО можно обозначить как FSNDP/D/1.

Оценка параметра Херста в потоке на выходе системы FSNDP/D/1 (рис. 3) показывает, что степень самоподобия зависит как от степени самоподобия в исходном потоке, так и от загрузки системы. На основании проведенных имитационных экспериментов можно сформулировать следующие выводы.

1. Значение параметра Херста H возрастает с ростом загрузки СМО. H существенно растет при ρ до 0,4–0,5, далее рост замедляется, для высоконагруженных систем H превышает 0,9, что означает поток с крайне высокой степенью фрактальности, и дальнейшее увеличение ρ на фрактальность выходного потока существенного влияния не оказывает. Такое поведение характерно для исходных потоков как с маловыраженным самоподобием, так и с ярко выраженным.

2. Для слабнонагруженных систем значение параметра Херста в выходном потоке несколько выше входного, но сопоставимо со входным. Это может использоваться как приближение при имитационном моделировании и при численных расчетах. Статистические характеристики входного и выходного потоков слабнонагруженной СМО FSNDP/D/1 в части фрактальных характеристик могут условно считаться одинаковыми.

Для систем с высокой загрузкой влияние степени самоподобия входного потока нивелируется, значения на выходе оказываются одинаковыми, приближенны-

ми к 1, даже для входных потоков с крайне слабо выраженными фрактальными свойствами ($H < 0,6$). Это, однако, имеет малое практическое значение, так как для фрактального трафика очередь в СМО растет крайне быстро с ростом ρ за счет высокой пачечности и сильной корреляционной структуры; область $\rho > 0,5$ –0,6 на практике означает систему, режим которой близок к выходу за пределы стационарного.

На прикладном уровне явление роста самоподобных свойств с ростом загрузки СМО может быть объяснено «эффектом полки», когда в пиковых интервалах за счет ограниченной пропускной способности независимо от поступления исходной нагрузки на выходе формируется постоянное или близкое к постоянному значение, соответствующее ограничению полосы (на рис. 4 профиль трафика для искусственно сгенерированного среза 3 с $H = 0,7$). В предельном случае, для высоконагруженных систем с ρ , стремящимся к 1, можно получить постоянный профиль трафика без случайных флуктуаций, «срезанный» по ширине полосы и полностью заполняющий канал. При этом в теории фрактальных процессов известно [4], что детерминированный процесс без случайной компоненты является абсолютно самоподобным с параметром $H = 1$. Рост H в сторону 1 при увеличении выраженных постоянных фрагментов выглядит объяснимым.

Заключение. Полученные результаты позволяют говорить о том, что поток на выходе СМО с фрактальным поступлением не только сохраняет общие фрактальные свойства, но и демонстрирует устойчивые зависимости как от параметров входного потока, так и от параметров СМО. В настоящее время ведется работа над исследованием характера этих зависимостей с целью получения соотношений, которые позволили бы численно оценить характеристики потоков.

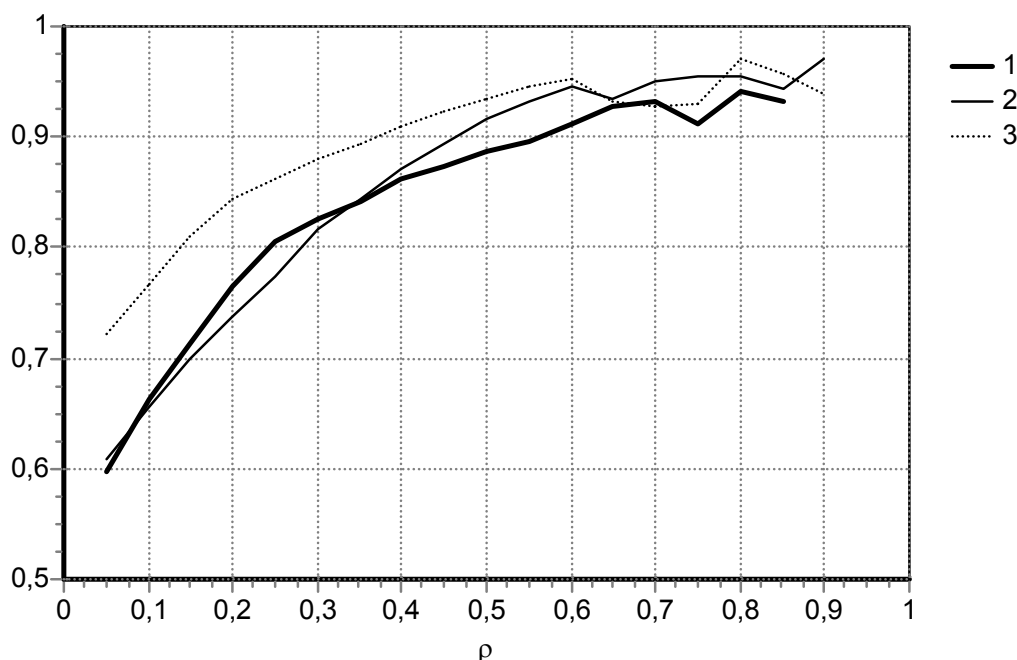


Рис. 3. Зависимость H от загрузки системы в выходном потоке для моделей таблицы

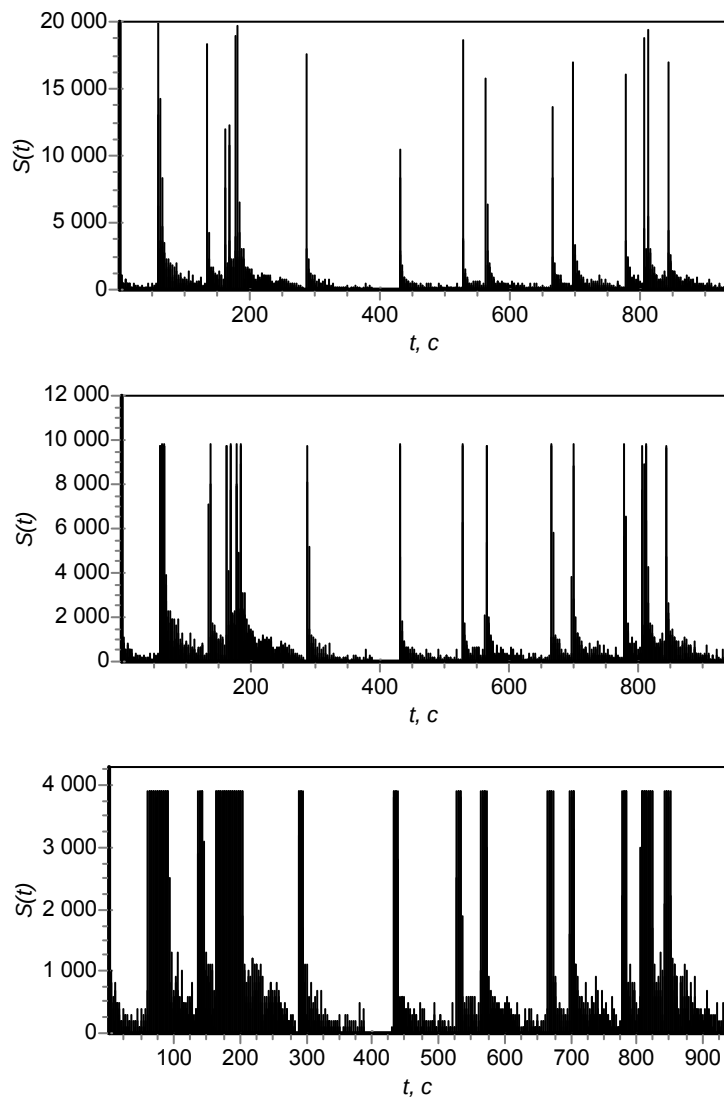


Рис. 4. Профиль трафика модели: входной, выходной с загрузкой 0,05 и 0,25

Также выявленный эффект, следствием которого является общность качественных характеристик фрактальных потоков до и после прохождения системы массового обслуживания с очередью, открывает широкое поле для исследований в области сетей массового обслуживания, в частности, на основе тензорных методов.

Актуальность темы статьи подтверждается исследованиями в работах [16; 17].

Библиографические ссылки

1. Цыбаков Б. С. Модель телетрафика на основе самоподобного случайного процесса // Радиотехника. 1999. № 5. С. 24–31.
2. Нейман В. И. Новое направление в теории телетрафика // Электросвязь. 1998. № 7. С. 27–30.
3. Нейман В. И. Самоподобные процессы и их применение в теории телетрафика // Тр. Междунар. Акад. связи. 1999. № 1. С. 11–15.
4. Шелухин О. И., Теняшев А. М., Осин А. В. Фрактальные процессы в телекоммуникациях : монография. М. : Радиотехника, 2003. 480 с.
5. Norros I. The Management of Large Flows of Connectionless Traffic on the Basis of Self-Similar Modeling // ICC '95, IEEE International Conference on Communications. Seattle, 1995. P. 344–356.
6. Соколов Д. Е., Треногин Н. Г. Линейный фрактальный устойчивый шум как модель трафика в системах обработки данных // Современные проблемы информатизации в технике и технологиях : сб. тр. Воронеж : Научная книга, 2004. Вып. 10. С. 263–264.
7. Петров М. Н., Пономарев Д. Ю. Самоподобие в системах массового обслуживания с ограниченным буфером // Электросвязь. 2002. № 2. С. 35–39.
8. Треногин Н. Г., Соколов Д. Е. Моделирование сетевого трафика в информационных системах на основе фрактального точечного процесса // Вестник университетского комплекса : сб. науч. тр. / под общ. ред. проф. Н. В. Василенко. Красноярск : ВСФ РГУИТП, НИИ СУВПТ, 2004. Вып. 2(16). С. 12–21.
9. Кокс Д., Льюис П. Статистический анализ последовательностей событий / пер. с англ. И. А. Маховой, В. В. Рыкова ; ред. Н. П. Бусленко. М. : Мир, 1969. 310 с.

10. Ryu B. K. Fractal Network Traffic: From Understanding to Implications : Ph.D. thesis. Columbia University, 1996. 143 p.
11. Ryu B., Lowen S. Modeling, analysis and simulation of self-similar traffic using the fractal-shot-noise-driven Poisson process // Proc. IASTED Modeling and Simulation. Pittsburgh, PA, 1995.
12. Соколов Д. Е., Треногин Н. Г. Характер сетевого трафика на клиентском участке распределенной клиент-серверной системы // Информатика и проблемы телекоммуникаций : материалы Междунар. науч.-техн. конференции. Новосибирск : СибГУТИ, 2001. С. 34–35.
13. Соколов Д. Е. Моделирование нагрузки в клиент-серверных системах на основе фрактальных процессов // Управляющие и вычислительные системы. Новые технологии : материалы межвузовской науч.-техн. конференции. Вологда, 2001. С. 59–60.
14. Терехов В. И., Соколов Д. Е., Треногин Н. Г. Мониторинг и анализ трафика в IP-сетях: комплексный подход // Информатика и проблемы телекоммуникаций : материалы Междунар. науч.-техн. конф. Новосибирск : СибГУТИ, 2001. С. 36.
15. Соколов Д. Е., Треногин Н. Г. Фрактальные свойства трафика в действующей двухзвенной системе обработки данных // Современные проблемы информатизации в технике и технологиях : сб. тр. Воронеж : Научная книга, 2004. Вып. 10. С. 264–265.
16. Петров М. Н., Треногин Н. Г., Веловатый Е. А. Система поддержки операционной и бизнес-деятельности предприятия связи с использованием тензорной методологии анализа систем // Электро-связь. 2013. № 1. С. 17–20.
17. Веловатый Е. А. Оптимизация корпоративных информационных систем с использованием методов тензорного анализа : дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск : СибГУТИ, 2014.
1. Tsybakov B. S. [Teletraffic model based on Self-similar random process]. *Radiotechnica*. 1999, No. 5, P. 24–31 (In Russ.).
2. Neiman V. I. [New direction in teletraffic theory]. *Electrosvyaz*. 1998, No. 7, P. 27–30 (In Russ.).
3. Neiman V. I. [Self-similar processes and their application in teletraffic theory]. *Trudy Mezhdunarodnoy Akademii Svyazi*. 1999, No. 1, P. 11–15 (In Russ.).
4. Shelukhin O., Tenyakshev A., Osin A. *Fraktal'nye protsessy telekommunikatsiyakh* [Fractal processes in telecommunications]. Moscow, Radiotechnica Publ., 2004, 480 p.
5. Norros I. The Management of Large Flows of Connectionless Traffic on the Basis of Self-Similar Modeling. *ICC '95, IEEE International Conference on Communications*. Seattle, 1995, P. 344–356.
6. Sokolov D. E., Trenogin N. G. [Linear fractal stable noise as a model of traffic in data processing systems]. *Sovremennye problemy informatizatsii v tekhnike i tekhnologiyakh*. [Modern problems of informatization in technics and technologies]. Voronezh, Nauchnaya kniga Publ., 2004, No. 10, P. 263–264 (In Russ.).
7. Petrov M. N., Ponomaryov D. Y. [Self-similarity in queuing systems with limited buffer]. *Electrosvyaz*. 2002, No. 2, P. 35–39 (In Russ.).
8. Trenogin N. G., Sokolov D. E. [Modeling of network traffic basing on a fractal point process]. *Vestnik universitetskogo kompleksa*. 2004, No. 2(16), P. 12–21 (In Russ.).
9. Cox D., Lewis P. The statistical analysis of series of events. Chapman and Hall, 1966, 285 p.
10. Ryu B. K. Fractal Network Traffic: From Understanding to Implications. Ph.D. thesis. Columbia University, 1996, 143 p.
11. Ryu B., Lowen S. Modeling, analysis and simulation of self-similar traffic using the fractal-shot-noise-driven Poisson process. *Proc. IASTED Modeling and Simulation*, Pittsburgh, PA, 1995.
12. Sokolov D. E., Trenogin N. G. [The nature of the network traffic to the client site distributed client-server system]. *Materialy mezhvuzovskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Upravlyayushchie i vychislitel'nye sistemy. Novye tekhnologii"* [International scientific-technical conference Informatics and problems of telecommunications]. Novosibirsk, SibSUTIS Publ., 2001, P. 34–35 (In Russ.).
13. Sokolov D. E. [Modeling of load in a client-server systems based on fractal processes. Inter-university scientific-technical conference "Control and computer systems. New technologies"]. Vologda, 2001, P. 59–60. (In Russ.).
14. Terekhov V. I., Sokolov D. E., Trenogin N. G. [Monitoring and analysis of the traffic in IP-based networks: an integrated approach]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Informatika i problemy telekommunikatsiy"*. [International scientific-technical conference Informatics and problems of telecommunications]. Novosibirsk, SibSUTIS Publ., 2001, P. 36 (In Russ.).
15. Sokolov D. E., Trenogin N. G. [Fractal properties of traffic in an actual two-tier data-processing system]. *Sovremennye problemy informatizatsii v tekhnike i tekhnologiyakh*. [Modern problems of informatization in technics and technologies]. Voronezh, Nauchnaya kniga Publ., 2004, No. 10, P. 264–265 (In Russ.).
16. Petrov M. N., Trenogin N. G., Velovaty E. A. [System of support of the operating room and business activity of telecommunications agency with use of tensor methodology of the analysis of systems]. *Elektrosvyaz*. 2013, No. 1, P. 17–20 (In Russ.).
17. Velovaty E. A. *Optimizatsiya korporativnykh informatsionnykh sistem s ispol'zovaniem metodov tenzornogo analiza*. *Kand. Diss.* [Optimization of corporate information systems with use of methods of the tensor analysis. Kand. Diss.]. Novosibirsk, 2014.

References