

6. *M. Sagawa, M. Makimoto, and S. Yamashita, "Geometrical structures and fundamental characteristics of microwave stepped-impedance resonators" // IEEE Trans. MTT. – Vol. 45, № 7.*
7. Сканирующие антенные системы СВЧ: Пер. с англ. / Под ред. Г.Т. Маркова, А.Ф. Чаплина. Т. 1-3. – М.: Сов. радио, 1966-1971.
8. *Михайлов Г.Д., Сергеев В.И., Соломин Э.А., Воронов В.А. Методы и средства уменьшения радиолокационной заметности антенных систем // Зарубежная радиоэлектроника. Спец. вып. «Проблемные вопросы уменьшения РЛЗ объектов». – 1994. – № 5. – С. 54-59.*
9. *J. Shaker, L. Shafai, H. Moheb, Analysis of frequency selective surfaces with open and short circuited elements // Proc. 8th IEE Int. Conf. on Ant. and Propag., Edinburgh, UK, 1993. – P. 261-264.*

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Д.Д. Габриэлян.

Касьянов Александр Олегович – Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге; e-mail: kasao@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634388844; кафедра антенн и радиопередающих устройств; профессор.

Строчков Сергей Евгеньевич – e-mail: s-sterg@yandex.ru; тел.: +79185547954; кафедра антенн и радиопередающих устройств; аспирант.

Kasyanov Alexandr Olegovich – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: kasao@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634388844; the department of antennas and radio transmitters; professor.

Stochkov Sergej Evgen'evich – e-mail: s-sterg@yandex.ru; phone: +79185547954; the department of antennas and radio transmitters; postgraduate student.

УДК 656.25

С.М. Ковалев, В.П. Терновой

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМ ТРАНСПОРТОМ НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНОГО АНАЛИЗА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ТРАФИКА

Статья посвящена аспектам использования информационного обмена в качестве основы для анализа динамики в автоматизированных системах управления железнодорожным транспортом. Впервые предлагается метод прогнозирования динамики таких систем на основе временных рядов телекоммуникационного трафика. Предложен комбинированный метод прогнозирования, состоящий из этапов нелинейного анализа и линейного прогнозирования. Предложен алгоритм локального прогнозирования телетрафика, позволяющий принимать управляющие решения в рассматриваемом классе систем.

Нелинейный анализ; прогнозирование телекоммуникационного трафика; автоматизированные системы управления на железнодорожном транспорте.

S.M. Kovalev, V.P. Ternovoy

PREDICTION OF THE DYNAMICS OF AUTOMATED CONTROL SYSTEMS RAIL-BASED NONLINEAR ANALYSIS TELECOMMUNICATIONS TRAFFIC

Article is dedicated aspects of use of an information exchange as a basis for dynamics analysis in the automated control systems of railway transportation. The new method of dynamics forecasting of such systems on the basis of telecommunication traffic time series is offered. The com-

bined method of forecasting consisting of stages of the nonlinear analysis and linear forecasting is offered. The algorithm of the local teletraffic forecasting allowing to make operating decisions in a considered class of systems is offered.

Nonlinear analysis; telecommunication traffic forecasting; automated control systems of railway transportation.

1. Особенности информационного обмена в автоматизированных системах управления железнодорожным транспортом. Многие подсистемы автоматизированных систем управления на железнодорожном транспорте (АСУЖТ) объединены в распределенную корпоративную сеть ОАО «РЖД» и должны функционировать в реальном времени. Между подсистемами передаются значительные объемы разнородной информации, создавая тем самым различные динамические характеристики телекоммуникационного трафика. Среди систем с интенсивным телекоммуникационным трафиком выделяется ряд высоко динамичных автоматизированных систем верхнего уровня управления железнодорожным транспортом. Рассмотрим подробнее особенности функционирования, а также масштабы обрабатываемой и передаваемой информации в этих системах.

Одной из важнейших АСУЖТ является Сетевая интегрированная российская информационно-управляющая система (СИРИУС) [1], которая позволяет объединить и структурировать информацию, циркулирующую внутри и между различными информационно-управляющими системами на железнодорожном транспорте. Она обладает развитой аналитической частью, работает в режиме реального времени и направлена на использование единой нормативной базы на всех уровнях управления.

Для контроля поездной ситуации на сети железных дорог предназначена автоматизированная система управления графиком исполняемого движения (АСУ ГИД) «Урал-ВНИИЖТ» [1], которая состоит из следующих подсистем: ГИД ДНЦ – для поездного диспетчера, ГИД ДСП – для дежурного по станции, ГИД ДППГ – для диспетчера по управлению поездопотоками. В систему АСУ ГИД входят: связь с автоматизированной системой оперативного управления перевозками (АСОУП) и системой сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ), а также единая дорожная база предупреждений. АСУ ГИД выполняет множество функций.

Для создания и поддержки в масштабе реального времени информационной модели перевозочного процесса, прогнозирования и текущего планирования эксплуатационной работы железных дорог предназначена упомянутая выше система АСОУП. Эта система обеспечивает оперативной информацией соответствующих работников своей дороги, соседних дорог и центрального аппарата ОАО «РЖД». АСОУП представляет собой многоуровневую общесетевую информационно-управляющую систему, базирующуюся на вычислительных комплексах 17 дорожных информационно-вычислительных центров и вычислительном комплексе Главного вычислительного центра ОАО «РЖД» [2].

Система ДИСПАРК [1] (автоматизированная система пономерного учета, контроля, дислокации, анализа использования и регулирования вагонными парками) является одной из важнейших прикладных АСУЖТ и развивается на основе SAS-технологий. В систему встроена база данных с очень высокой степенью детализации сведений по техническим, технологическим и географическим признакам в масштабе реального времени, что требует от системы непрерывной, безошибочной и безотказной информационной поддержки, возможности передачи и приема сообщений в устойчивом режиме. К ДИСПАРКу подключены: АРМ товарных кассиров, система интегрированной обработки дорожной ведомости на дорожном и сетевом уровнях, центры фирменного транспортного обслуживания, создана единая информационно-управляющая система на всех уровнях, включая грузовла-

дельцев. Эти факты свидетельствуют о том, что с системой ДИСПАРК связаны очень большие объемы передаваемой информации. С другой стороны, ДИСПАРК – это механизм управления. В системе поддерживаются в актуальном состоянии динамические вагонные модели дорог и сети, обеспечивающие полную сходимость данных по грузовой работе, общему и пономерному наличию вагонов грузового парка и составляющим его элементам. В системе поддерживается единая динамическая вагонная модель, обеспечивающая при однократном вводе данных об операциях с поездами, вагонами и грузами их многократное использование.

Для автоматизации управления контейнерными перевозками предназначена система ДИСКОН [3]. Основная цель системы – повышение эффективности контейнерных перевозок, которые ведутся на всех железных дорогах страны. Автоматизированная система обработки маршрута машиниста (ИОММ) предназначена для автоматизированного учета работы подвижного состава, расхода топлива и электроэнергии, а также для учета рабочего времени и заработной платы локомотивным бригадам. Важнейшим звеном комплекса является АРМ оператора центра оперативно-технического учета локомотивного депо (АРМ ТЧУ), предназначенный для подготовки, ввода, отображения и использования результатов обработки документов маршрута машиниста. Главной задачей АРМ ТЧУ является его функционирование во взаимосвязи с дорожным комплексом ИОММ, а также возможность взаимодействия с АСУ локомотивных депо и системами оперативного управления перевозочным процессом. В системе управления в ОАО «РЖД» также в режимах реального времени функционируют и взаимодействуют между собой АСУ сортировочной станции (АСУ СС), управления грузовой станцией (АСУ ГС), контейнерным пунктом (АСУ КП), пассажирскими перевозками (Экспресс-3) и многие другие.

При такой интенсивности информационного обмена в телекоммуникационном трафике АСУЖТ наблюдаются известные эффекты больших всплесков, самоподобия, долговременной зависимости [4, 5], которые применительно к информационным потокам в АСУЖТ изучались в работе [6] с помощью методов теории случайных процессов и теории массового обслуживания. Заметим, что основное внимание в работе [6] уделяется моделированию процессов, происходящих в телекоммуникационном трафике АСУЖТ, но не менее важными для реальных приложений являются задачи прогнозирования, предсказания и предупреждения нарушений устойчивости информационного обмена, естественным образом влияющие на динамику функционирования систем. В соответствии с этим, целью данной статьи является разработка практически реализуемого алгоритма краткосрочного прогнозирования динамики функционирования АСУЖТ в зависимости от поступающих объемов телекоммуникационного трафика (телетрафика) на основе комбинирования интеллектуальных и нелинейных способов обработки временных рядов.

Этапы предлагаемого метода и предварительные замечания. Прежде всего, рассмотрим основные этапы предлагаемого метода прогнозирования в укрупненном виде. Метод включает следующие этапы: предварительный анализ телекоммуникационного трафика в АСУЖТ, развертывание аппаратно-программной системы сбора телетрафика, сохранение файлов с объемами телетрафика за периоды времени, извлечение характеристик телетрафика и получение временных рядов; принятие решения о применимости методов нелинейного анализа и прогноза; реконструкция фазового пространства по одномерным временным рядам с вычислением временного лага и размерности вложения; алгоритм линейного прогнозирования динамики телекоммуникационного трафика АСУЖТ.

Этап сбора телетрафика организован так, чтобы не вмешиваться и не нарушать режимы функционирования АСУЖТ. В связи с тем, что в корпоративной

сети ОАО «РЖД», в том числе и в сегменте Северо-Кавказской железной дороги используется телекоммуникационное оборудование CISCO была использована функция зеркалирования трафика (*Switch Port Analyzer*, *SPAN*) с одного или нескольких сетевых портов на другой, к которому подключен ноутбук с установленным программным обеспечением *Microsoft Network Monitor* [7], как показано на рис. 1. Это программное обеспечение относится к классу анализаторов сетевых протоколов, имеет в своем составе модули захвата и сохранения пакетного трафика, а также его классификации. В результате функционирования *Microsoft Network Monitor* были сформированы временные ряды абсолютных объемов поступившего трафика, которые в дальнейшем условимся обозначать $\{x(t_i)\}_{i=1}^N$, где N – количество замеров трафика.

Большинство научных публикаций в теории пакетного телекоммуникационного трафика, начиная с наиболее ранней из них [8], посвящено исследованиям свойств трафика, связанных с феноменом самоподобия. И хотя данное обстоятельство было установлено в результате практических измерений трафика в многомасштабном режиме для Ethernet сетей, феномен самоподобия был довольно скоро распространен на поведение глобальной сети Интернет [9]. Как следствие этого появился ряд теоретических моделей телекоммуникационного трафика [5, 6], основанный на случайных процессах со свойствами фрактальности и вытекающими отсюда специальными свойствами второго порядка у случайных процессов. К ним относятся, например, стремление дисперсии случайного процесса к бесконечности, что проявляется в виде «взрывного, лавинообразного» поступления объемов трафика либо расхождение ряда, образованного последовательными значениями корреляционной функции, что означает «долгую память» случайного процесса.

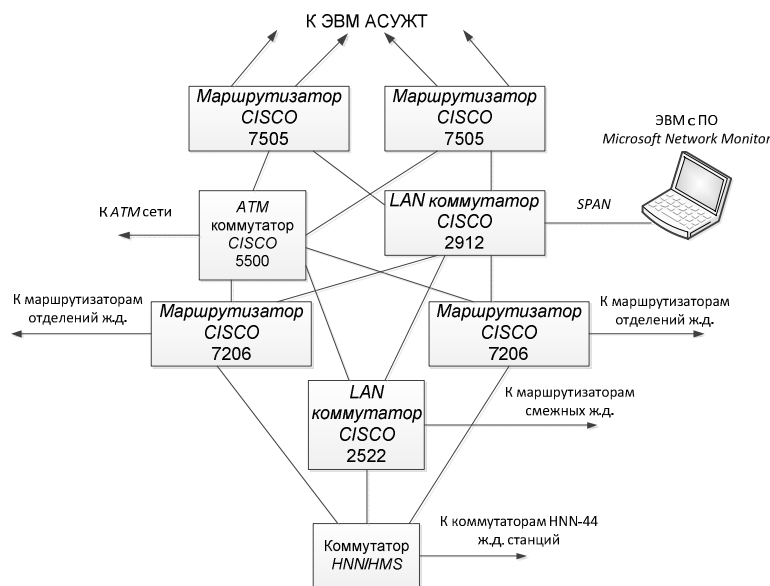


Рис. 1. Схема организации сбора телетрафика в региональном узле информационно-вычислительного центра Северо-Кавказской железной дороги

На возможность моделирования системы, в которой циркулирует телекоммуникационный трафик, методами нелинейной динамики исследователи обратили внимание, пожалуй, не более чем 5–7 лет назад [10]. В последнее время появляются

ся работы, связанные с восстановлением и прогнозированием динамики функционирования системы по наблюдаемому трафику, например, [11] и библиография в ней. Указанные проблемы и задача, рассматриваемая в данной работе, решаются с помощью метода реконструкции фазового пространства динамической системы по набору наблюдаемых выходных значений в виде одномерного временного ряда. Этот метод [12] основывается на возможности вложения компактного многообразия в евклидово пространство достаточной размерности (теорема Уитни) и возможностью использовать временной ряд координат, продуцируемый динамической системой, имеющей компактный многомерный аттрактор построения его копии в евклидовом пространстве подходящей размерности с запаздыванием координат (теорема Такенса).

Суть реконструкции состоит в следующем. Для одномерного временного ряда $\{x(1), x(2), \dots, x(n)\}$ образуются векторы вида:

$$V_{(m,\tau)}(i) = [x(i), x(i+\tau), \dots, x(i+(m-1)\tau)], \quad (1)$$

где m – размерность вложения, τ – временной лаг (запаздывание), $i = 1, 2, \dots, n - (m-1)\tau$.

Таким образом, из ряда $\{x(1), x(2), \dots, x(n)\}$ формируется матрица $\mathbf{V}_{(m,\tau)}$ размерностью $(n - (m-1)\tau) \times m$, каждая строка которой определяет точку в m -мерном реконструируемом пространстве,

$$\mathbf{V}_{(m,\tau)} = \begin{bmatrix} x(1) & \dots & x((m-2)\tau+1) & x((m-1)\tau+1) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ x(n-1-(m-1)\tau) & \dots & x(n-1-\tau) & x(n-1) \\ x(n-(m-1)\tau) & \dots & x(n-\tau) & x(n) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Так, например, при $m=3$, $\tau=4$, $n=10$ будет сформирована матрица

$$\mathbf{V}_{(3,4)} = \begin{bmatrix} x(1) & x(5) & x(9) \\ x(2) & x(6) & x(10) \end{bmatrix},$$

а при увеличении n и формировании матриц по выражению (2) восстанавливается динамика системы как отображение $F: \mathbf{V}_{(m,\tau)}^n \rightarrow \mathbf{V}_{(m,\tau)}^{n+1}$.

Принятие решения о применимости методов нелинейного анализа и прогноза. Одной из первых задач, возникающей при прогнозировании по временным рядам является выбор адекватной модели, хотя бы в смысле обоснования этого выбора. Авторы данной работы считают, что указанную задачу выбора, заключающуюся в принятии решения о применимости линейной, либо нелинейной модели прогноза необходимо решать формально. Предлагается следующий подход. Пусть $\{x(n)\}_{n \in F}$ обозначает одномерный временной ряд, имеющий математическое ожидание $\mathbf{M}[\{x(n)\}_{n \in F}] = 0$. Обычно считается, что если для $m > 1$ любых произвольно выбираемых из временного ряда величин $x(k_1), x(k_2), \dots, x(k_m)$ их совместное распределение вероятностей является нормальным, то подходящим будет линейное прогнозирование вида $\mathbf{M}[x(n+1)|x(n), x(n-1), \dots]$, иначе следует обратиться к нелинейным моделям. Такое решение не вызывает нареканий, но на практике вид распределения вероятностей случайного вектора $\mathbf{x}[x(k_1), x(k_2), \dots, x(k_m)]$ может оказаться плохо согласованным с многомерным

нормальным распределением или быть неизвестным. На наш взгляд в данном случае можно обойтись без установления факта нормальности распределения, а ограничиться более простым способом, заключающимся в оценке нелинейности временного ряда, наличие которой позволяет сделать вывод о необходимости применения нелинейных методов прогноза. Для двух случайных векторов $\mathbf{x}(n)$ и $\mathbf{x}(n-j)$, $j \geq 1$, рассмотрим статистику вида

$$L_j = \frac{\mathbf{D}[\mathbf{x}(n)]\rho(j)^2}{\mathbf{D}[\mathbf{M}[\mathbf{x}(n)|\mathbf{x}(n-j)]]}, \quad (3)$$

где $\mathbf{D}[\mathbf{x}(n)]$ – дисперсия вектора $\mathbf{x}(n)$; $\rho(j) = \mathbf{M}[\mathbf{x}(n)\mathbf{x}(n-j)] / \mathbf{D}[\mathbf{x}(n)]$ – коэффициент автокорреляции; $\mathbf{D}[\mathbf{M}[\mathbf{x}(n)|\mathbf{x}(n-j)]]$ – дисперсия условного математического ожидания случайного вектора $\mathbf{x}(n)$ относительно $\mathbf{x}(n-j)$.

В общем случае границы изменения величины (3) составляют $0 > L_j \geq 1$. В случае, когда совместное распределение случайных векторов $\mathbf{x}(n)$ и $\mathbf{x}(n-j)$ является нормальным, либо «почти» нормальное, величина L_j будет близка к 1, то адекватным выбором будет являться использование линейных моделей прогнозирования. При $L_j \ll 1$ более обоснованным представляется использование нелинейных моделей прогноза.

Реконструкция фазового пространства по одномерным временным рядам с вычислением временного лага и размерности вложения. Общие подходы, предлагаемые для вычисления вложенной размерности и временного лага, которые необходимы для реконструкции фазового пространства можно найти в [12–14].

Временной лаг τ вычисляется как параметр автокорреляционной функции временного ряда

$$r(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^{n-\tau} (x(i) - \bar{x})(x(i+\tau) - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x(i) - \bar{x})^2}, \quad (4)$$

где $\tau \in (1, 2, \dots, n-1)$, $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x(i)$.

Начиная с $\tau = 0$ и с шагом $\tau = 1$ рассчитывается выражение (4), далее процесс выполняется итеративно. В качестве результата выбирается такое первое значение временного лага τ , при котором автокорреляционная функция становится меньше нуля, а в некоторых работах берется значение $r(\tau) \leq (1 - 1/e) \approx 0,632$. Для определения размерности пространства вложения, а точнее минимальной необходимой размерности, которую будем обозначать m_0 , был предложен способ, известный сейчас под названием метода ложных ближайших соседей [12]. Он имеет простое геометрическое толкование. Представим, что выполняется реконструкция по способу, представляемому выражением (1). Тогда для каждого вектора $\mathbf{V}_{(m,\tau)}(i)$ можно сформировать также вектор его ближайших соседей:

$$\mathbf{V}_{(m,\tau)}^{NN}(i) = [x^{NN}(i), x^{NN}(i+\tau), \dots, x^{NN}(i+(m-1)\tau)]. \quad (5)$$

Конкретное значение величины m , присутствующей в выражениях (1) и (5) играет значительную роль, заключающуюся в том, что при $m < m_0$ реконструированное фазовое пространство может не «уместиться» в пространство в действительности занимаемое динамической системой. Из-за этого орбиты в реконструируемом фазовом пространстве будут часто пересекаться, из чего вытекает наличие большого числа ближайших точек к некоторой произвольно выбранной координате. Однако следует учитывать и факт, что при выборе $m \gg m_0$ орбиты в восстановленном фазовом пространстве могут «расплываться», образуя тем самым уже не устойчивые и компактные аттракторы системы, а случайно сформированные множества. В связи с этим метод ложных ближайших соседей состоит в итеративной процедуре построения векторов $\mathbf{V}_{(m+1,\tau)}(i) = [\mathbf{V}_{(m,\tau)}(i), x(i+m\tau)]$ и $\mathbf{V}_{(m+1,\tau)}^{NN}(i) = [\mathbf{V}_{(m,\tau)}^{NN}(i), x^{NN}(i+m\tau)]$, начиная с $m=1$ и до получения некоторой подходящей величины m_0 при которой достигается заданное пороговое расстояние между этими векторами. Квадрат евклидова расстояния между соседними ближайшими точками векторов для m -й размерности

$$r_m(i)^2 = \sum_{k=1}^m (x(i+(k-1)\tau) - x^{NN}(i+(k-1)\tau))^2, \quad (6)$$

а для $m+1$ из выражения (6) следует, что

$$r_{m+1}(i)^2 = \sum_{k=1}^{m+1} (x(i+(k-1)\tau) - x^{NN}(i+(k-1)\tau))^2 = r_m(i)^2 + (x(i+m\tau) - x^{NN}(i+m\tau))^2.$$

Тогда, для отсеечения ложных ближайших соседних точек в реконструируемом фазовом пространстве, при переходе от размерности m к размерности $m+1$ можно применять пороговое значение r_T так, чтобы

$$\sqrt{\frac{r_{m+1}(i)^2 - r_m(i)^2}{r_m(i)^2}} = \frac{|x(i+m\tau) - x^{NN}(i+m\tau)|}{r_m(i)} = \frac{|x(i+m\tau) - x^{NN}(i+m\tau)|}{\|\mathbf{V}_{(m,\tau)}(i) - \mathbf{V}_{(m,\tau)}^{NN}(i)\|} > r_T. \quad (7)$$

Заметим, что величина порогового значения в выражении (7) подбирается эвристически на интервале $10 \leq r_T \leq 50$, например, в [12] рекомендуется $r_T = 15$.

Алгоритмическая и программная реализация изложенных принципов и конкретные вычислительные схемы расчета m и τ рассматриваются в работе [15].

Алгоритм локального прогнозирования на основе метода реконструкции фазового пространства. Заключаящим этапом предлагаемого нами метода является применение локального метода прогнозирования телекоммуникационного трафика АСУЖТ. Как один из простых и приемлемых вариантов можно рассматривать применение линейной модели, состоящей из следующих шагов.

Шаг 1. По данным временных рядов телетрафика АСУЖТ выполнить реконструкцию фазового пространства.

Шаг 2. Для каждой реконструированной координаты X_n найти D -мерный вектор ближайших соседних точек $\mathbf{x}^{NN} = [X_{k_1}, X_{k_2}, \dots, X_{k_D}]$, причем $D = 2m + 1$, m – размерность пространства вложения.

Шаг 3. Рассматривая уравнение

$$x(s+h) - x(p+h) = \sum_{k=1}^m a_k (x(s - (k-1)\tau) - x(p)) \text{ и используя вектор } \mathbf{X}^{NN}$$

вычислить коэффициенты a_k , $k = 1, \dots, m$ по методу Левенберга–Марквардта [16].

Шаг 4. Рассчитывать прогнозируемое значение по выражению:

$$\hat{x}(n+h) = x(p+h) + \sum_{k=1}^m a_k (x(s - (k-1)\tau) - x(p)).$$

Очевиден факт, что данный алгоритм позволяет выполнить его программную реализацию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Гапанович, В.А., Грачев А.А. и др.* Системы автоматизации и информационные технологии на железнодорожном транспорте: Учебник для вузов ж.-д. транспорта. – М.: Маршрут, 2006. – 544 с.
2. <http://www.1520mm.ru/traffic/index.phtml>.
3. *Орлюк, А.А., Крестинин А.В., Козлов Ю.Т.* Состояние и перспективы развития системы ДИСКОН // Автоматика, связь, информатика. – 2002. – № 9.
4. *Крылов В.В., Самохвалова С.С.* Теория телетрафика и её приложения. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 288 с.
5. *Шелухин О.И., Осин А.В., Смольский С.М.* Самоподобие и фракталы. Телекоммуникационные приложения / Под ред. О.И. Шелухина. – М.: Физматлит, 2008. – 368 с.
6. *Бутакова М.А.* Модели информационных потоков в системах массового обслуживания на транспорте. – Ростов-на-Дону: Изд-во Рост. ун-та, 2006. – 228 с.
7. <http://www.microsoft.com/ru/ru/softmicrosoft/netmonitor.aspx>.
8. *Leland W.E., Taqqu M.S., Willinger W, Wilson D.V.* On the self-similar nature of Ethernet traffic (extended version) // IEEEACM Trans. On Networking. – 1994. – Vol. 2. – P. 1-15.
9. *Willinger W, Paxson V.* Where mathematics meets the Internet // Notices of the AMS. – 1998. – Vol. 45. – P. 961-970.
10. *Zhang W., Wu Z., Yang G.* Chaotic network attractor in packet traffic series // Comp. Phys. Comm. – 2004. – Vol. 161, Iss. 3. – P. 129-142.
11. *Feng H., Shu Y., Yang O.W.W.* Nonlinear analysis of wireless LAN traffic // Nonlinear Analysis: Real World Applications. – 2009. – Vol. 10, Iss. 2. – P. 1021-1028.
12. *Abarbanel H.D.I.* Analysis of observed chaotic data. Springer-Verlag, New York, 1996. – 272 p.
13. *Gao J. [et al.].* Multiscale analysis of complex time series integration of chaos and random fractal theory, and beyond. John Wiley & Sons. New Jersey, 2007. – 354 p.
14. *Kantz H., Schreiber T.* Nonlinear time series analysis. Cambridge University Press, Edinburgh, 2003. – 370 p.
15. *Гуда А.Н., Бутакова М.А., Терновой В.П.* Алгоритмы и программное обеспечение для обнаружения аномалий в телекоммуникационном трафике автоматизированных систем управления железнодорожным транспортом методами нелинейной динамики // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2011. – № 3. – С. 21-30.
16. *Бард Й.* Нелинейное оценивание параметров. – М.: Статистика, 1979.

Статью рекомендовала к опубликованию д.т.н., профессор Г.В. Горелова.

Ковалев Сергей Михайлович – Ростовский государственный университет путей сообщения; e-mail: ksm@rfniias.ru; 344038, г. Ростов-на-Дону. пл. Ростовского стрелкового полка народного ополчения, 2; тел.: 88632726302; д.т.н.; профессор.

Терновой Владимир Александрович – студент.

Kovalev Sergej Mixailovich – Rostov State Transport University; e-mail: ksm@rfniias.ru; 2, Rostov Shooting the Shelf of the National Home guard square, Rostov-on-Don, 344038; Russia; phone: +78632726302; dr. of eng. sc.; professor.

Ternovoj Vladimir Alexandrovich – student.