

УДК 681.324

С.А. Нестеренко, д-р техн. наук,
Л.В. Иванова

ПРОПУСКНАЯ СПОСОБНОСТЬ СКВОЗНОГО КАНАЛА БЕСПРОВОДНОГО СЕГМЕНТА СЕТИ СТАНДАРТА IEEE 802.11

Проведены статистические экспериментальные исследования пропускной способности сквозного канала беспроводного сегмента сети стандарта IEEE 802.11. На основе экспериментально полученных данных построена регрессионная модель для расчета пропускной способности сквозного канала беспроводного сегмента сети указанного стандарта.

Ключевые слова: регрессионная модель, сквозной канал, беспроводной сегмент сети, беспроводной адаптер, пропускная способность.

S.A. Nesterenko, ScD,
L.V. Ivanova

AN END-TO-END CHANNEL CAPACITY OF THE 802.11 IEEE STANDARD WIRELESS NETWORK SEGMENT

The statistical experimental research of an end-to-end channel capacity of the 802.11 IEEE standard wireless network segment are carried out. On the basis of experimental data the regression model of the 802.11 IEEE standard wireless network segment end-to-end channel capacity was constructed.

Keywords: regression model, end-to-end channel, wireless network segment, wireless card, capacity.

С.А. Нестеренко, д-р техн. наук,
Л.В. Иванова

ПРОПУСКНА ЗДАТНІСТЬ НАСКРІЗНОГО КАНАЛУ БЕЗДРОТОВОГО СЕГМЕНТУ МЕРЕЖІ СТАНДАРТУ IEEE 802.11

Проведено статистичні експериментальні дослідження пропускної здатності наскрізного каналу бездротового сегмента мережі стандарту IEEE 802.11. На основі експериментально отриманих даних побудовано регресійну модель для розрахунку пропускної здатності наскрізного каналу бездротового сегмента мережі вказаного стандарту.

Ключові слова: регресійна модель, наскрізний канал, бездротовий сегмент мережі, бездротовий адаптер, пропускна здатність.

Из всех существующих в настоящее время технологий для построения беспроводных корпоративных сетей наиболее востребованной является технология на базе стандарта IEEE802.11. Эффективное проектирование беспроводных сетей возможно только при наличии моделей, которые описывают пропускную способность беспроводного канала связи. Построение математических моделей беспроводных сетей не представляется возможным в силу большого количества факторов, влияющих на производительность канала.

Не представляется возможным учет таких факторов, которых, как топологические и конструктивные параметры зданий, в которых разворачиваются беспроводные сети. Не менее трудно учитываемым параметром является состояние радиозэфира, в среде которого предполагается функционирование сети.

Конструктивным подходом к решению

данной проблемы является создание регрессионных моделей, строящихся на основе натурных экспериментов с использованием реального оборудования в среде помещений, где предполагается развертывание беспроводной сети [1].

В статье рассмотрена методика построения регрессионной модели для расчета пропускной способности сквозного канала беспроводного сегмента сети стандарта IEEE802.11. Модель позволяет рассчитывать пропускную способность сети на уровне «процесс–процесс» и учитывает параметры не только беспроводного канала связи, но и системного интерфейса, связывающего сетевой адаптер и ПЭВМ. В качестве системных интерфейсов исследуются интерфейсы PCI и Cardbus, которые наиболее часто применяются для подключения беспроводных адаптеров связи к ПЭВМ.

Для проведения статистического экспериментального исследования пропускной

© Нестеренко С.А., Иванова Л.В., 2012

способности сквозного канала беспроводного сегмента сети предлагается использовать программно-аппаратный измерительный комплекс, содержащий точку доступа, набор абонентских станций и программное обеспечение для генерации трафика и мониторинга пропускной способности сети.

Для исследований зависимости сетевого трафика, проходящего через точку доступа, от количества узлов в сети число взаимодействующих узлов постепенно увеличивалось от двух до десяти. Кроме того, отметим, что вся беспроводная сеть, состоящая из десяти узлов и точки доступа, имела радиус не более 10 м, что обеспечивало оптимальные условия связи.

В качестве программного обеспечения предлагается использовать программный пакет *Chariot NetIQ*, который, по сути, является программным генератором сетевой нагрузки и позволяет измерять все необходимые параметры беспроводного сегмента. С его помощью можно определять пропускную способность сетевого адаптера как в режиме передачи, так и в режиме приема. Кроме того, измеряется скорость передачи/приема пакетов, количество операций ввода-вывода, а также степень утилизации процессора. Важно отметить, что программный пакет *Chariot NetIQ* позволяет не только измерять указанные параметры, но и *эмулировать* необходимую модель сетевого трафика. Настройке подлежат такие параметры, как размер запроса приема/передачи, процентное соотношение между случайным и последовательным распределением запросов, процентное соотношение между распределением операций приема/передачи [2].

На этапе тестирования рассматривался режим взаимодействия *Infrastructure*, когда все узлы беспроводной сети взаимодействовали с точкой доступа. Сама же точка доступа служила мостом между беспроводной сетью и проводной сетью *Ethernet*, к которой подключался сервер общего доступа (рис. 1). Рассматривалось взаимодействие узлов беспроводной сети с сервером. Измерялась пропускная способность беспроводной сети в режиме приема и передачи данных.

В режиме *Infrastructure* создавались условия для достижения максимальной интен-

сивности трафика в беспроводном сегменте, для чего время задержки между запросами устанавливалось равным нулю. Измеряемым параметром являлся сетевой трафик, проходящий через точку доступа.

Для тестов используются три скрипта, генерирующие различные типы трафика:

- пакеты максимального размера;
- пакеты размера 512 байт;
- пакеты размера 64 байта.

С помощью программы генерировался TCP-трафик (с пакетами преимущественно максимального размера) и моделировались все возможные ситуации:

- передача трафика (LAN → WLAN);
- передача трафика (WLAN → LAN).

В случае измерения пропускной способности в режиме приема данных на каждом из компьютеров-клиентов с операционной системой *Windows XP Professional* запускалась программа генератора, эмулирующая сетевой трафик.

В экспериментальных исследованиях использовалось оборудование:

- беспроводные сетевые Cardbus-адаптеры D-Link DWL-G650 и TRENDnet TEW-PC;
- беспроводные сетевые PCI-адаптеры D-Link DWL-G520 и TRENDnet TEW-633GR;
- компьютер локального (LAN) сегмента;
- точка доступа D-Link DWL-2100AP;
- точка доступа TRENDnet TEW-610APB;

Режимы работы точки доступа:

- обычный (54 Мбит/с)
- режим 802.11g Super G (108 Мбит/с).

На основании экспериментальных данных возможно построение регрессионной модели вида, где FR – функция регрессии, N – число абонентов беспроводной сети.

В классической математической статистике предполагается известным вид закона распределения и производится оценка значений его параметров по результатам наблюдений. Но обычно заранее при проведении экспериментов вид закона распределения неизвестен, а теоретические предположения не позволяют его однозначно установить. Обработка экспериментальных данных также не позволяет точно вычислить истинный закон распределения. В таком случае следует говорить только об аппроксимации

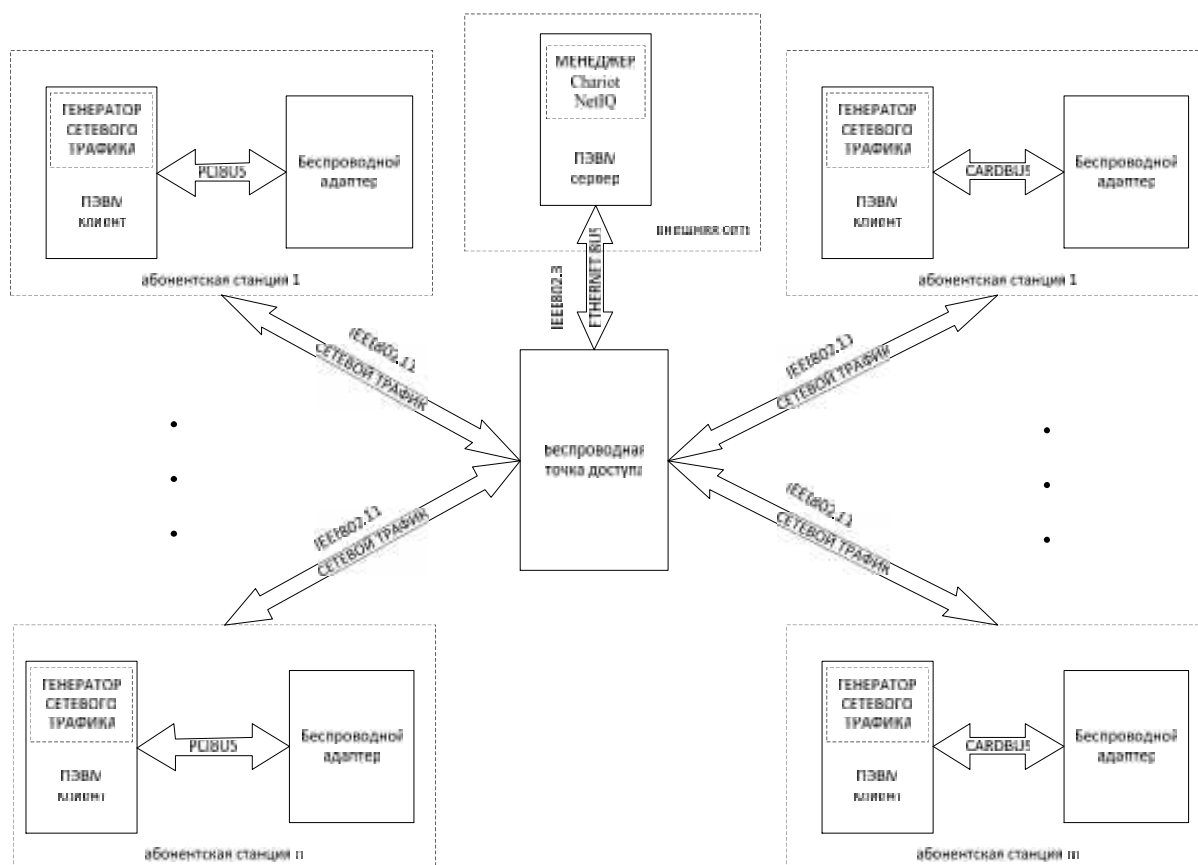


Рис. 1. Схема тестирования беспроводного сегмента сети

(приближенном описании) реального закона некоторым другим, который не противоречит экспериментальным данным и, в каком-то смысле, похож на неизвестный истинный закон.

В соответствии с этими положениями постановка задачи аппроксимации закона распределения экспериментальных данных формулируется следующим образом. Имеется выборка наблюдений (x_1, x_2, \dots, x_n) случайной величины X . Объем выборки N фиксирован. Необходимо подобрать закон распределения (вид и параметры), который бы в статистическом смысле соответствовал имеющимся наблюдениям [3].

В качестве аппроксимирующих зависимостей, как правило, используются логарифмическая, полиномиальная, степенная, линейная и экспоненциальная зависимости. С учетом используемой зависимости регрессионная модель может иметь вид зависимости:

линейной

$$y = a_0x + a_1, \quad (1)$$

полиномиальной

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2, \quad (2)$$

степенной

$$y = a_0 + \frac{a_1}{x}, \quad (3)$$

экспоненциальной

$$y = a_0e^{a_1x}, \quad (4)$$

где a_0, a_1, a_2 - коэффициенты регрессии.

Коэффициенты регрессии могут быть определены методом наименьших квадратов. Метод наименьших квадратов является одним из основных для определения параметров регрессионных уравнений. Он позволяет получить наилучшие линейные несмещенные оценки.

Сущность метода заключается в нахождении параметров модели, при которых сумма квадратов отклонений эмпирических (фактических) значений результирующего признака от теоретических, полученных по выбранному уравнению регрессии, то есть:

$$S = \sum_{i=1}^n (y_i^p - y_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i^p - a_0 - a_1x)^2 \rightarrow \min,$$

где y_i^p – значение, вычисленное по уравнению регрессии; $(y_i^p - y_i)$ – отклонение ε (ошибка, остаток); n – количество пар исходных данных.

Для линейной зависимости коэффициенты регрессии определяются путем решения системы двух уравнений с двумя неизвестными a_0 и a_1 .

$$a_1 = \frac{n(\sum y_i x_i) - \sum y_i \sum x_i}{n(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2}; \quad (5)$$

$$a_0 = \frac{1}{n}(\sum y_i - a_1 \sum x_i). \quad (6)$$

При определении коэффициентов степенной и экспоненциальной зависимостей используют прием приведения нелинейной регрессионной зависимости к линейному виду. Это позволяет использовать для вычисления коэффициентов функций регрессии выше приведенные формулы.

Для приведения уравнения $y = a_0 + \frac{a_1}{x}$ к линейному виду вводят новую переменную $z = \frac{1}{x}$. Тогда уравнение гиперболы принимает линейный вид $y = a_0 + a_1 z$. После этого используют формулы (5) и (6) для нахождения линейной функции, но вместо значений X_i используются значения $z_i = \frac{1}{x_i}$

$$a_1 = \frac{n(\sum y_i z_i) - \sum y_i \sum z_i}{n(\sum z_i^2) - (\sum z_i)^2}; \quad (7)$$

$$a_0 = \frac{1}{n}(\sum y_i - a_1 \sum z_i). \quad (8)$$

Для приведения к линейному виду уравнения экспоненты $y = a_0 e^{a_1 x}$ проведем логарифмирование:

$$\begin{aligned} \ln y &= \ln(a_0 e^{a_1 x}); \\ \ln y &= \ln a_0 + \ln(e^{a_1 x}); \\ \ln y &= \ln a_0 + a_1 x. \end{aligned}$$

Введем переменные $b_0 = \ln a_0$ и $b_1 = a_1$, тогда $\ln y = b_0 + b_1 x$, откуда следует, что можно применять формулы (5) и (6), в которых вместо значений y_i надо использовать $\ln y_i$

$$b_1 = \frac{n(\sum [\ln y_i] x_i) - \sum \ln y_i \sum x_i}{n(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2}; \quad (9)$$

$$b_0 = \frac{1}{n}(\sum \ln y_i - b_1 \sum x_i) \quad (10)$$

При этом мы получим численные значения коэффициентов b_0 и b_1 , от которых надо перейти к a_0 и a_1 , используемых в модели экспоненты. Исходя из введенных обозначений и определения логарифма, получаем

$$a_0 = e^{b_0}, \quad a_1 = b_1.$$

Чтобы найти коэффициенты уравнения параболы $y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2$, необходимо решить линейную систему из трех уравнений

$$\begin{cases} n \cdot a_0 + (\sum x_i) a_1 + (\sum x_i^2) a_2 = \sum y_i, \\ (\sum x_i) a_0 + (\sum x_i^2) a_1 + (\sum x_i^3) a_2 = \sum (y_i x_i), \\ (\sum x_i^2) a_0 + (\sum x_i^3) a_1 + (\sum x_i^4) a_2 = \sum (y_i x_i^2). \end{cases} \quad (11)$$

Для анализа общего качества уравнения регрессии используют обычно *множественный коэффициент детерминации* R^2 , называемый также квадратом коэффициента множественной корреляции R . R^2 (мера определенности) всегда находится в пределах интервала $[0; 1]$.

Если значение R^2 близко к единице, это означает, что построенная модель объясняет почти всю изменчивость соответствующих переменных. И наоборот, значение R -квадрата, близкое к нулю, означает плохое качество построенной модели.

Коэффициент детерминации R^2 показывает, на сколько процентов найденная функция регрессии описывает связь между исходными значениями факторов X и Y

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i^p - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2},$$

где $(y_i^p - \bar{y})^2$ – объясненная вариация; $(y_i - \bar{y})^2$ – общая вариация.

Для построения регрессионной модели пропускной способности сквозного канала беспроводного сегмента сети и прогнозирования необходимо:

получить значения пропускной способности сквозного канала беспроводного сегмента сети на основе экспериментальных исследований;

построить график исходных данных; выбрать функции регрессии, которые могут описывать связь исходных данных для

регрессионного анализа;

определить численные коэффициенты функции регрессии методом наименьших квадратов;

оценить силу найденной регрессионной зависимости на основе коэффициента детерминации R^2 ;

построить регрессионную модель на основе функции регрессии с наибольшим коэффициентом детерминации.

Для определения пропускной способности сквозного канала беспроводного сегмента сети были проведены экспериментальные исследования, учитывающие режимы работы беспроводного канала стандарта 802.11 и особенности используемого оборудования. На рисунках 2 – 3 представлены экспериментальные зависимости пропускной способности сети от количества абонентов при различных скоростных режимах работы стандарта 802.11 с использованием *PCI* и *Cardbus* адаптеров.

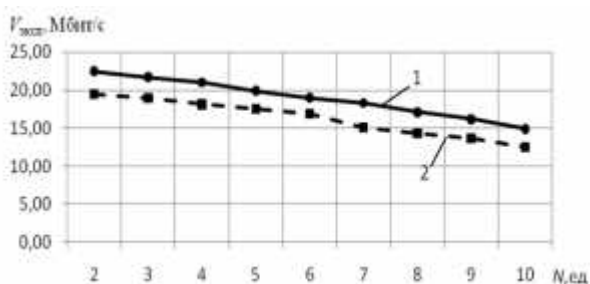


Рис. 2. Пропускная способность беспроводного сегмента сети при работе точки доступа в обычном режиме 802.11g (54Мбит/с): 1– для *PCI*-адаптеров; 2– для *Cardbus*-адаптеров

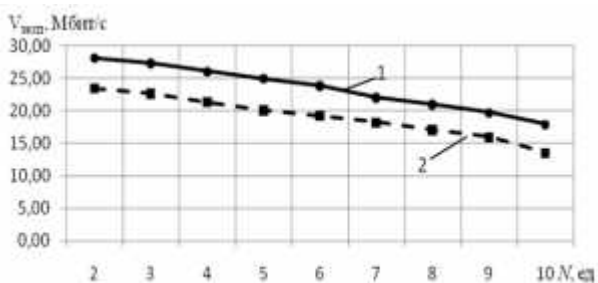


Рис. 3. Пропускная способность беспроводного сегмента сети при работе точки доступа в режиме 802.11 Super G (108Мбит/с): 1– для *PCI*-адаптеров; 2– для *Cardbus*-адаптеров

Анализ экспериментальных данных показывает, что пропускная способность сквозного беспроводного канала существенно зависит не только от базовых параметров технологии IEEE 802.11, но и от используемого в сетевых адаптерах системного интерфейса.

Для вышеперечисленных функций регрессии с использованием встроенных средств пакета *MS Excel* проведен регрессионный анализ, определены коэффициенты регрессии и коэффициент детерминации.

В таблице 1 представлены сводные данные по результатам вычислений коэффициента детерминации для выбранных функций регрессии.

1. Коэффициенты детерминации для функций регрессии

Функция регрессии	Коэффициент детерминации ($R^2 \cdot 100\%$)
полиномиальная зависимость.....	97,2
степенная зависимость.....	96,7
линейная зависимость....	97,9
экспоненциальная зависимость.....	98,6

Наибольший коэффициент детерминации имеет функция регрессии, построенная на основе экспоненциальной зависимости, соответственно регрессионная модель пропускной способности беспроводного сегмента сети будет иметь вид

$$V_{PEГ} = ae^{-bN}$$

где N – количество абонентов; a, b – коэффициенты, зависящие от скоростного режима беспроводного стандарта, характеристик используемого оборудования, топологии сети и внешней среды.

С использованием метода наименьших квадратов получены следующие зависимости коэффициентов от количества абонентов с использованием *Cardbus* – адаптеров

$$a = 4,56 \cdot \ln(V_H)$$

$$b = 0,37 \cdot V_H^{-0,5}$$

Для *PCI* – адаптеров коэффициенты вычисляются по следующим формулам:

$$a = 5,34 \cdot \ln(V_H)$$

$$b = 0,37 \cdot V_H^{-0,5}$$

где V_H – номинальная пропускная способность, определяемая скоростным режимом соответствующего беспроводного стандарта.

Таким образом, регрессионная модель пропускной способности сквозного канала беспроводного сегмента сети стандарта IEEE802.11 V_{PEF} будет иметь вид

$$V_{PEF} = \begin{cases} 4,56 \ln(V_H) e^{-0,37 V_H^{-0,5} N}, & \text{Cardbus} \\ 5,34 \ln(V_H) e^{-0,37 V_H^{-0,5} N}, & \text{PCI} \end{cases}$$

На рис. 4 – 5 показана экспериментальная и регрессионная зависимость пропускной способности беспроводной сети.

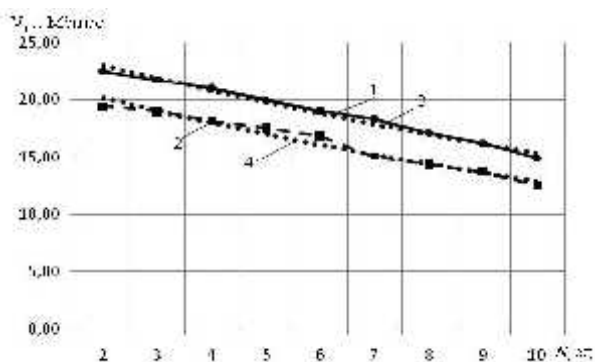


Рис. 4. Аппроксимация пропускной способности беспроводного сегмента сети при работе точки доступа в обычном режиме 802.11g (54Мбит/с): 1 – PCI эксперимент; 2– Cardbus эксперимент; 3 – PCI аппроксимация; 4– Cardbus аппроксимация

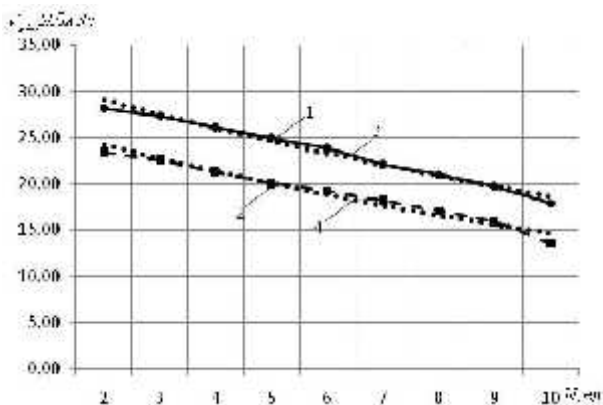


Рис. 5. Аппроксимация пропускной способности беспроводного сегмента сети при работе точек доступа в режиме 802.11 Super G (108Мбит/с): 1 - PCI эксперимент; 2– Cardbus эксперимент; 3 – PCI аппроксимация; 4– Cardbus аппроксимация

Анализ результатов показывает, что максимальная погрешность аппроксимации не превышает 5 %. Это говорит о высокой точности регрессионной модели, полученной с использованием экспоненциальной аппроксимации, что позволяет использовать ее в задачах анализа и синтеза сегментов беспроводных сетей, работающих в различных режимах и использующих различные типы беспроводных адаптеров.

Предложенная методика и инструментальный комплекс для проведения натурных экспериментов позволяют строить регрессионные модели беспроводных сегментов компьютерных сетей на уровне сквозного канала передачи данных. Модели обладают высокой точностью, что позволяет использовать их при проектировании беспроводных сегментов при заданном количестве абонентов беспроводной сети, а также определять возможности расширения существующих сегментов сети, построенных на базе различного коммуникационного оборудования с учетом используемого режима работы и реального топологического окружения.

1. Пахомов С.Д. Технологии беспроводных сетей семейства 802.11 / С.Д. Пахомов // Автоматика и телемеханика. – М.: Наука. – 2004. – № 3. – С. 10–15.

2. Баканов А.С. Метод оценки показателей производительности беспроводных сетей с централизованным управлением / А.С. Баканов, В.М. Вишневский // Автоматика и телемеханика. – М.: Наука. – 2000. – № 4. – С.97–105.

3. Браверман Э.М., Структурные методы обработки эмпирических данных / Э.М. Браверман, И.Б. Мучник. Учебник для вузов. – М.: Наука, 1983. – 560 с.

Получено 10.02.2012

References

1. Pahomov S.D. Wireless technologies a family of 802.11 / Sci-Tech/ magazine " Automation and Remote Control". – Moscow: Science. – 2004. – № 3. – P.10–15 [in Russian].

2. Bakanov A.S., Vishnevskiy V.M. A method of estimating performance measures of wireless networks with centralized control / Scitech magazine". Automation and Remote Control". – Moscow: Science. – 2000. – № 4. – С.97–105 [in Russian].

3. Braverman E.M., Mychnik I.B. Structural methods of processing of empirical data / Textbook of high school. – Moscow: Science, 1983. – 560 p. [in Russian].



Нестеренко
Сергей Анатольевич,
д-р техн. наук, проф., про-
ректор по учебной и науч-
но-педагогической работе
Одесск. нац. политехн.
ун-та



Иванова
Лилия Викторовна,
преподаватель Одесск.
техн. колледжа,
т. 720-32-41,
e_mail: otk_ivanova@mail.ru