

УДК 656.34

А. М. Костроминов, С. А. Рахманин, Б. О. Смирнов, О. Н. Тюляндин**КОНТРОЛЬ СОСТОЯНИЯ РИДЕР-АНТЕННОГО ТРАКТА АППАРАТУРЫ СБПП
В УСЛОВИЯХ ЭЛЕКТРОДЕПО МЕТРОПОЛИТЕНА**

Дата поступления: 21.04.2016

Решение о публикации: 10.05.2016

Цель: Разработать стационарный метод контроля состояния ридер-антенного тракта аппаратуры системы бесконтактной привязки к координатам пути (СБПП). **Методы:** При анализе и решении исходной задачи использован аксиоматико-дедуктивный метод. Для верификации некоторых положений предложенного метода применен корреляционный анализ. Аппроксимация экспериментальных кривых выполнена по методу наименьших квадратов. **Результаты:** Сформулированы основные положения по рассматриваемому тракту. Экспериментально получены функциональные зависимости, характеризующие процесс увеличения «паразитного» затухания. Разработан возможный метод контроля состояния ридер-антенного тракта. Даны рекомендации по его применению. **Практическая значимость:** Причиной роста интереса к данной теме послужили несколько случаев увеличения затухания сигналов в ридер-антенном тракте. Предложенный метод позволяет увеличить надежность функционирования СБПП, так как минимизирует вероятность выхода на линию поездов с неработоспособным RFID-оборудованием.

RFID-технологии, ридер-антенный тракт, контроль состояния, увеличение затухания, система бесконтактной привязки к пути, СБПП.

Alexander M. Kostrominov, D. Eng., professor, triak@grozon.sbp.ru; **Sergey A. Rakhmanin**, postgraduate student, beethovin@mail.ru; **Bogdan O. Smirnov**, student, smirnov@vklay.ru; ***Oleg N. Tyulyandin**, postgraduate student, tyulyandin@vklay.ru (Petersburg State Transport University)
CONTROL OF READER-ANTENNA LINK OF SNCBT EQUIPMENT IN THE CONDITIONS OF METRO DEPOT

Objective: To develop a stationary method for control of reader-antenna link for the system of non-contact binding to the underground track (SNCBT). **Methods:** The original problem was solved by axiomatic deductive method. Correlation analysis was applied for verification of certain provisions. The method of least squares was used for the approximation of experimental curve data. **Results:** The basic positions for the link under consideration were formulated. Experimentally derived functional relationships for increasing the «parasitic» attenuation were obtained. A possible reader-antenna link control method was developed. Recommendations on its application were given. **Practical importance:** Several cases of increasing attenuation of signals in the reader-antenna link attracted attention to this subject. The proposed method makes it possible to increase the reliability of SNCBT as it minimises the likelihood of trains with inoperable RFID-equipment entering line.

RFID-technology, reader-antenna link, control of conditions, increasing the attenuation, SNCBT, the system of non-contact binding to the underground track.

В процессе эксплуатации системы бесконтактной привязки к пути (СБПП), базовой частью которой являются RFID-средства [2, 11,

12] (радиометки, устанавливаемые на стенах тоннеля, и ридеры с антеннами, располагаемые на борту головных вагонов пассажирских

поездов) [4–6], имели место случаи увеличения затухания сигналов в цепи ридер – антенна. Вероятные причины затухания – повышение переходного сопротивления в разъемах кабельного соединения ридера с антенной, а также возможное затекание влаги в разъемные соединения при мойке вагонов. Отсюда следует задача – разработать метод контроля состояния тракта ридер – антенна, позволяющий убедиться в его работоспособности в процессе плановых технических осмотров перед выездом поездов из электродепо на линию.

Способ решения задачи

Рассмотрим возможный метод контроля состояния ридер-антенного тракта аппаратуры СБПП, но сначала введем несколько уточнений для облегчения чтения и понимания последующего текста.

Во-первых, условимся под расстоянием между радиометкой и антенной ридера понимать длину пространственного отрезка, соединяющего центры излучающей плоскости антенны и радиометки, причем последние располагаются друг напротив друга.

Во-вторых, введем условное понятие предельного расстояния между радиометкой и антенной ридера. Логично предположить: из-за того, что в выходной цепи ридера мощность конечна, существует некоторое предельное расстояние между радиометкой и антенной, при котором можно установить сеанс обмена информацией в RFID-системе (подробнее с процедурой установления сеанса связи можно ознакомиться в [14]).

И в-третьих, определим понятие ширины зоны радиовидимости. В общем смысле под шириной зоны радиовидимости следует понимать максимально достижимую длину пространственного отрезка, параллельного излучающей плоскости антенны и совпадающего с осью движения метки, на котором можно установить сеанс обмена информацией в RFID-системе. А в узком смысле (справедли-

во при эксплуатации поездов) – метрическое продвижение поезда от момента начала установления сеанса связи с меткой до момента обрыва обмена информацией.

С учетом сказанного перейдем к обоснованию и описанию предлагаемого нами метода контроля.

Сперва перечислим необходимые аксиоматические сведения об исследуемом радиотракте:

- в ридерах поездной аппаратуры СБПП есть возможность изменять уровень мощности P_{cir} в его выходной цепи;
- уровень излучаемой антенной мощности P_{rad} равен разнице между уровнем мощности в выходной цепи ридера и величиной «паразитного» затухания a_0 в ридер-антенном тракте:

$$P_{rad} = P_{cir} - a_0, \text{ дБм};$$

- «паразитное» затухание в эталонном радиотракте принимается равным нулю;
- имеет место функциональная зависимость предельного расстояния между радиометкой и антенной d_m от уровня излучаемой мощности;
- существует функциональная зависимость ширины зоны радиовидимости l на некотором расстоянии между радиометкой и антенной от уровня излучаемой мощности.

Теперь выберем параметр, подходящий для контроля состояния радиотракта. На первый взгляд может показаться, что таковым является значение «паразитного» затухания; но по нему сложно нормировать тракт ридер – антенна, так как отклонения в работе системы остаются скрытыми.

С нашей точки зрения, в качестве контрольного параметра рациональнее использовать ширину зоны радиовидимости на расстоянии между радиометкой и антенной, как в тоннеле. Причина такого выбора кроется в прямой зависимости числа сеансов связи между ридером и меткой от ширины зоны радиовидимости при эксплуатации системы. Нетрудно заметить, что число сеансов связи определяет надежность функционирования RFID-системы.

Наконец, сформулируем двухэтапный метод контроля состояния тракта, являющийся дедуктивным следствием озвученных аксиом (подробнее о дедукции в [8]).

На первом этапе проверки необходимо оценить значение «паразитного» затухания. Для этого следует:

- поместить метку на некотором контрольном расстоянии от антенны d_c (выбирается в зависимости от внешних условий: малое расстояние между смежными путями в электродепо, препятствие в виде стены и т. д.);

- подобрать уровень мощности p_c в выходной цепи ридера (например последовательным перебором), при которой контрольное расстояние совпадет с предельным;

- после успешного подбора вычислить значение «паразитного» затухания

$$a_0 = p_c - p_{rad}(d_c), \text{ дБ}, \quad (1)$$

где $p_{rad}(d_c)$ – уровень излучаемой мощности эталонным оборудованием, соответствующий предельному расстоянию d_c .

На втором этапе – оценить эксплуатационную ширину зоны радиовидимости. Для этого сначала надо вычислить фактический уровень излучаемой мощности (как разность уровня мощности в выходной цепи ридера и значения полученного «паразитного» затухания), а затем через найденное значение по известной функциональной зависимости оценить искомый параметр.

Очевидно, что для реализации предложенного метода контроля необходимо исследовать функциональные зависимости между различными параметрами, характеризующими ридер-антенный тракт, так как априорно они неизвестны.

Экспериментальные исследования

Программа и методика исследований

Согласно предложенному методу контроля, требуется экспериментальное изучение следующих функциональных зависимостей:

- зависимости предельного расстояния между меткой и антенной от уровня излучаемой мощности;

- зависимости эксплуатационной ширины зоны радиовидимости от уровня излучаемой мощности.

Для исследований на кафедре «Электрическая связь» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I был установлен испытательный стенд, включающий в себя эталонное каналобразующее RFID-оборудование аппаратуры СБПП (ридер, антенну, разъемы, высокочастотный кабель) и ноутбук со специально разработанным программным обеспечением.

Отметим, что на стенде нет возможности физически вносить «паразитное» затухание, поэтому при исследовании зависимости эксплуатационной ширины зоны радиовидимости от уровня излучаемой мощности последняя изменялась с уровнем мощности в выходной цепи ридера. Справедливость этого допущения мы подтвердили экспериментально.

В представленных исследованиях принималась во внимание случайная природа чувствительности радиометок. Дисперсия параметров эталонного каналобразующего оборудования не рассматривалась. Используемый объем выборки составлял $n = 20$ радиометок.

Результаты исследований

Начнем с зависимости предельного расстояния между антенной и радиометкой от уровня излучаемой мощности. При ее исследовании использовали стендовое оборудование (напомним, что в таком случае «паразитное» затухание отсутствует и уровень излучаемой мощности равен уровню мощности в выходной цепи ридера).

Для каждого p , принадлежащего набору уровней излучаемой мощности каналобразующей аппаратурой $p_{rad} = \{5, 10, 15\}$ дБм, было статистически исследовано предельное расстояние между антенной и радиометкой. Большие значения уровня мощности не рас-

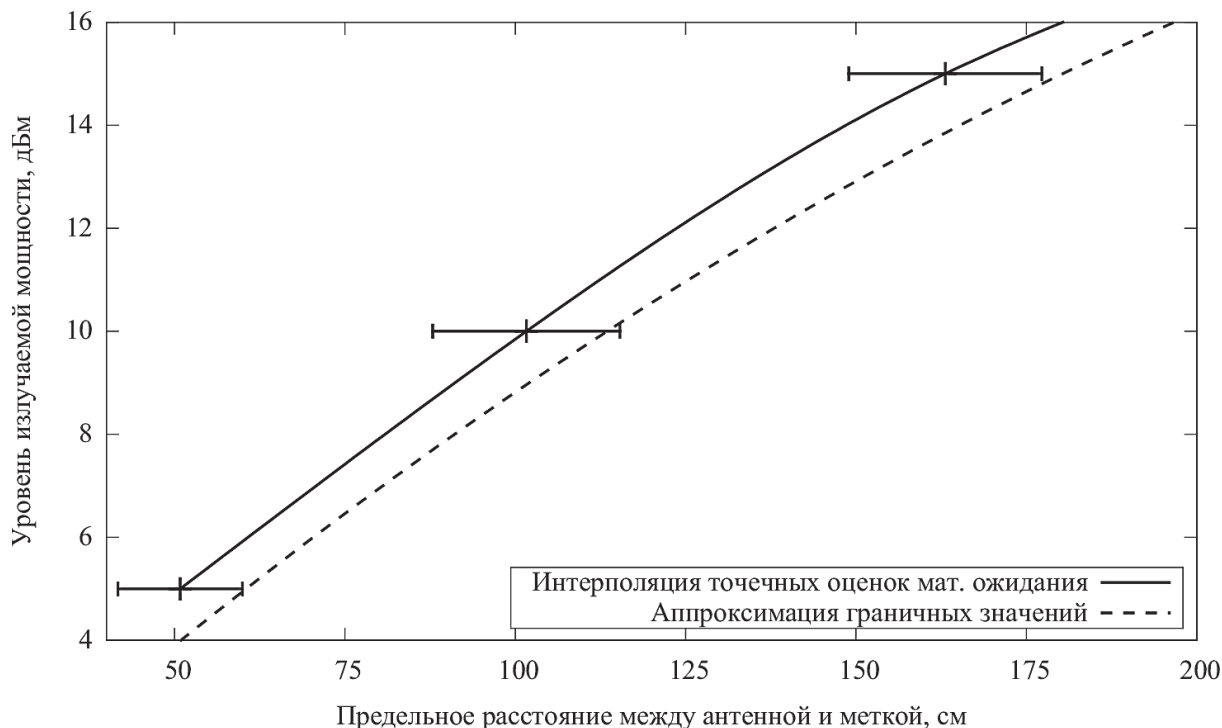


Рис. 1. Зависимость предельного расстояния между радиометкой и антенной от уровня излучаемой антенной мощности

сматривались, так как контрольное расстояние при них превышает межпутевое расстояние в условиях электродепо.

Результаты исследований представлены на рис. 1, где горизонтальными штрихами обозначен статистический интервал предельных расстояний, покрывающий диапазон возможных значений с вероятностью не менее 0,95.

Перейдем к рассмотрению зависимости эксплуатационной ширины зоны радиовидимости от уровня излучаемой мощности. Уточним, что при эксплуатации расстояние между антенной и радиометкой составляет 215 см.

Для каждого p , принадлежащего набору уровней излучаемой мощности $p_{rad} = \{30, 28, 26, 24, 22, 20, 18\}$ дБ, была статистически исследована эксплуатационная ширина зоны радиовидимости меток.

Графически результаты исследований представлены на рис. 2. Вертикальными штрихами показан интервал возможных значений ширины зоны радиовидимости, покрывающий диапазон возможных значений с вероятностью не менее 0,95.

При контроле состояния ридер-антенного тракта предлагалось оценивать значение «паразитного» затухания на контрольном расстоянии между антенной и меткой, выбираемом в зависимости от внешних условий. Рассмотрим через корреляционную зависимость, насколько сильно влияние дисперсии чувствительности контрольной радиометки на полученный результат.

Для этого введем многомерную случайную величину $\mathbf{R} = (r_5, r_{10}, r_{15})^T$, где r_5, r_{10}, r_{15} – случайные величины предельного расстояния между антенной и радиометкой на уровне излучаемой мощности $p = 5, 10, 15$ дБм, соответственно. Подробнее с многомерными случайными величинами и корреляцией можно ознакомиться в [1, 10, 13].

С помощью свободного программного обеспечения Maxima¹ вычислим корреляционную матрицу многомерной случайной величины \mathbf{R} :

¹ <http://maxima.sourceforge.net>.

$$\text{Corr}(\mathbf{R}) = \begin{pmatrix} 1,000 & 0,963 & 0,832 \\ 0,963 & 1,000 & 0,813 \\ 0,832 & 0,813 & 1,000 \end{pmatrix}.$$

Полученный результат подтверждает справедливость предлагаемого решения: погрешность оценки «паразитного» затухания из-за дисперсии чувствительности радиометки при изменении контрольного расстояния крайне мала.

Анализ результатов и рекомендации

Согласно предложенному методу контроля, на первом этапе необходимо вычислить значение «паразитного» затухания в тракте по формуле (1). Сразу возникает логичный вопрос, по какой экспериментальной кривой определять уровень излучаемой антенной мощности для исправного оборудования.

В качестве эталонной предлагаем выбрать кривую, соответствующую наихудшим возможным условиям. Данному требованию соответствует кривая, проходящая через гра-

ничные точки экспериментально полученной зависимости, как показано на рис. 1.

Для аппроксимации предложенной кривой полиномом второй степени (использован метод наименьших квадратов [7, 15]) используем следующее уравнение:

$$p_{rad}(d_m) = -0,0002 d_m^2 + 0,1228 d_m - 1,8322, \text{ дБм.}$$

На втором этапе контроля по полученному значению «паразитного» затухания оценивается ширина зоны радиовидимости. Поступим аналогичным образом при выборе функциональной зависимости, характеризующей влияние «паразитного» затухания на ширину зоны радиовидимости, и выберем наихудшие условия (см. рис. 2). Аппроксимация интересующей функции полиномом второй степени имеет вид

$$l(a_0) = -1,507 a_0^2 + 90,626 a_0 - 1145,69, \text{ см.}$$

На рис. 3 представлен возможный алгоритм контроля состояния радиотракта, выполненный с использованием псевдокода. Ознакомиться с понятием псевдокода можно в [3, 9].

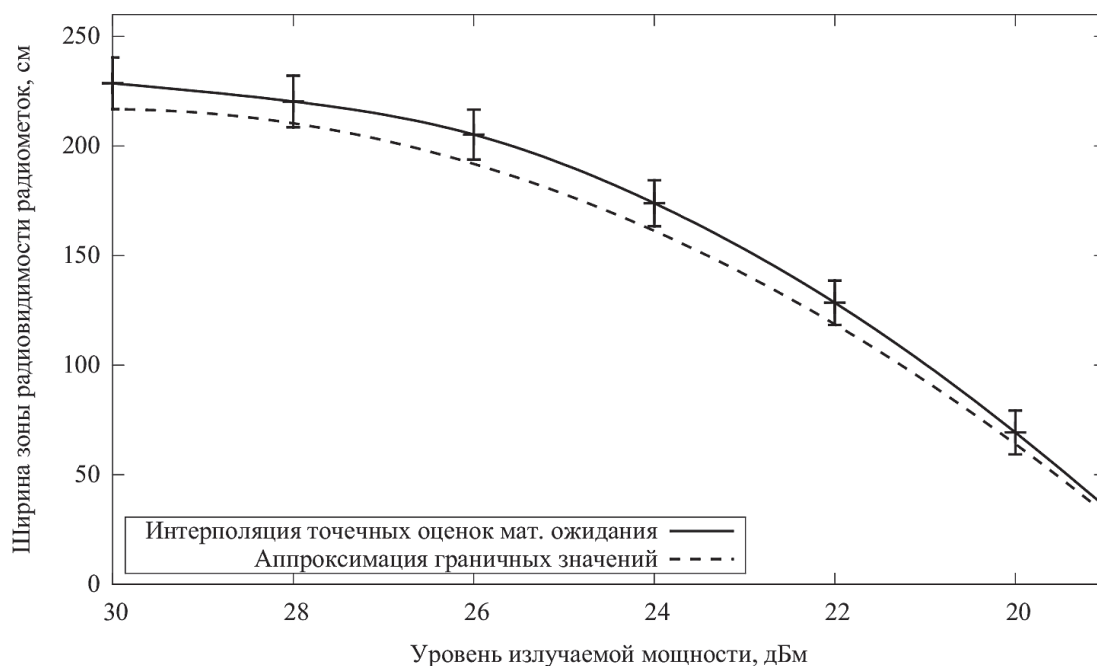


Рис. 2. Зависимость эксплуатационной ширины зоны радиовидимости от уровня излучаемой антенной мощности

Входные данные: контрольное расстояние d_c
Выходные данные: оценка ширины зоны радиовидимости l

```

/* Обозначим максимальный уровень мощности в выходной цепи ридера */
 $p_m \leftarrow 30$ ;
/* Определим эксплуатационный уровень мощности в выходной цепи ридера */
 $p_e \leftarrow 30$ ;
Инициализация ридера;
/* Зададим начальное значение уровня мощности в выходной цепи ридера */
 $p \leftarrow 6$ ;
пока выполняется условие «метка не видна» выполнять
   $p \leftarrow p + 1$ ;
  если  $p > p_m$  тогда
    Вывести сообщение «Метку не удалось обнаружить»;
    Прервать дальнейшее выполнение алгоритма;
  конец
конец
 $p \leftarrow p - 1$ ;
пока выполняется условие «метка не видна» выполнять
   $p \leftarrow p + 0,1$ ;
  если  $p > p_m$  тогда
    Вывести сообщение «Метку не удалось обнаружить»;
    Прервать дальнейшее выполнение алгоритма;
  конец
конец
/* Вычислим номинальный уровень мощности для  $d_c$  */
 $p_0 \leftarrow -0,0002 d_c^2 + 0,1228 d_c - 1,8322$ ;
/* Оценим значение «паразитного» затухания в тракте  $a_0$  */
 $a_0 \leftarrow p - p_0$ ;
/* Оценим ширину зоны радиовидимости  $l$  */
 $l \leftarrow -1,507 (p_e - a_0)^2 + 90,626 (p_e - a_0) - 1145,69$ ;

```

Рис. 3. Алгоритм контроля радиотракта

Заключение

Предложенный метод контроля состояния ридер-антенного тракта аппаратуры СБПП позволяет решить задачу, актуальную для эксплуатации системы бесконтактной привязки к пути, базирующейся на RFID-технологии. С помощью этого метода можно при плановом техническом осмотре или после выполнения плановых технических ремонтов выявить в стационарных условиях депо повышенное затухание в тракте ридер – антенна, принять превентивные меры и привести его в нормальное состояние до выхода поезда на линию.

Библиографический список

1. Вентцель Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель. – 4-е изд. – М. : Наука, 1969. – 576 с.

2. Дшхунян В. Л. Электронная идентификация. Бесконтактные электронные идентификаторы и смарт-карты / В. Л. Дшхунян, В. Ф. Шаньгин. – М. : АСТ ; НТ Пресс, 2004. – 695 с.

3. Кормен Т. Х. Алгоритмы: построение и анализ / Т. Х. Кормен, Ч. И. Лейзерсон, Р. Л. Ривест, К. Штайн. – 3-е изд. – М. : Вильямс, 2013. – 1328 с.

4. Костроминов А. М. Алгоритм функционирования системы управления движением электроподвижного состава в метрополитене на базе RFID-технологии / А. М. Костроминов, Т. В. Крючкова // Изв. ПГУПС. – 2014. – Вып. 2. – С. 42–48.

5. Костроминов А. М. Применение RFID-технологий в системе автоведения поездов метрополитена / А. М. Костроминов, М. Ю. Королев, В. В. Гаврилов, Т. В. Крючкова // Изв. ПГУПС. – 2009. – Вып. 3. – С. 91–97.

6. Костроминов А. М. Регрессионная модель зоны радиовидимости для системы бесконтактной

привязки к пути подвижного состава метрополитена / Костроминов А. М., Крючкова Т. В. // Транспорт Урала. – 2012. – Т. 34, № 3. – С. 49–53.

7. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений / Ю. В. Линник. – 2-е изд. – Л. : Физматгиз, 1962. – 352 с.

8. Светлов В. А. История научного метода / В. А. Светлов. – М. : Академический проект ; Деловая книга, 2008. – 700 с.

9. Cormen T. Introduction to Algorithms / T. Cormen, C. Leiserson, R. Rivest, C. Stein. – 3rd ed. – Cambridge, MA, USA : The MIT Press, 2009. – 1312 p.

10. Davidson A. C. Statistical Models / A. C. Davidson. – Cambridge, NY, USA : Cambridge Univ. Press, 2008. – 726 p.

11. Dobkin D. M. The RF in RFID : Passive UHF RFID in Practice / D. M. Dobkin. – Newton, MA, USA : Newnes, 2007. – 504 p.

12. Finkenzeller K. RFID Handbook. Fundamental and Applications in Contactless Smart Cards and Identification / K. Finkenzeller. – 2nd ed. – Chichester, West Sussex, England : Wiley, 2003. – 427 p.

13. Freedman D. Statistics. International student edition / D. Freedman, R. Pisani, R. Purves. – 4th ed. – NY, USA : W. W. Norton & Co., 2007. – 720 p.

14. GS1 EPCglobal Inc. – EPC™ Radio-Frequency Identity Protocols Generation-2 UHF RFID, 2015. – Online; accessed 11 April 2016. URL : http://www.gs1.org/sites/default/files/docs/epc/Gen2_Protocol_Standard.pdf.

15. Rao C. R. Linear Models: Least Squares and Alternatives / C. R. Rao, H. Toutenburg. – 2nd ed. – NY, USA : Springer, 1999. – 427 p.

References

1. Ventsel Ye. S. Teoriya veroyatnostey [Probability Theory]. Moscow, Nauka, 1969. 576 p.

2. Dshkhunyan V. L. & Shangin V. F. Elektronnaya identifikatsiya. Beskontaknyye elektronnyye identifikatory i smart-karty [Electronic Identification.

Contactless Electronic Identifiers and Smart Cards]. Moscow, AST, NT Press, 2004. 695 p.

3. Cormen T., Leiserson C., Rivest R. & Stein C. Algorithms: postroyeniye i analiz [Introduction to Algorithms]. 3rd ed. Moscow, Williams, 2013. 1328 p.

4. Kostrominov A. M. & Kryuchkova T. V. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2014, Is. 2, pp. 42-48.

5. Kostrominov A. M., Korolev M. Yu., Gavrilov V. V. & Kryuchkova T. V. *Izvestiya PGUPS – Proc. Petersburg Transp. Univ.*, 2009, Is. 3, pp. 91-97.

6. Kostrominov A. M. & Kryuchkova T. V. *Transport Urala – Urals Transport*, 2012, Vol. 34, Is. 3, pp. 49-53.

7. Linnik Yu. V. Metod naimenshikh kvadratov i osnovy matematiko-statisticheskoy teorii obrabotki nablyudeniy [Method of Least Squares and Principles of the Theory of Observations]. 2nd ed. Leningrad, Fizmatgiz, 1962. 352 p.

8. Svetlov V. A. Istoriya nauchnogo metoda [History of Scientific Method]. Moscow, Akademicheskii projekt, Delovaya kniga, 2008. 700 p.

9. Cormen T., Leiserson C., Rivest R. & Stein C. Introduction to Algorithms. 3rd ed. Cambridge, MA, USA, The MIT Press, 2009. 1312 p.

10. Davidson A. C. Statistical Models. Cambridge, NY, USA, Cambridge Univ. Press, 2008. 726 p.

11. Dobkin D. M. The RF in RFID: Passive UHF RFID in Practice. Newton, MA, USA, Newnes, 2007. 504 p.

12. Finkenzeller K. RFID Handbook. Fundamental and Applications in Contactless Smart Cards and Identification. 2nd ed. Chichester, West Sussex, England, Wiley, 2003. 427 p.

13. Freedman D., Pisani R. & Purves R. Statistics. International student edition. 4th ed. NY, USA, W. W. Norton & Company, 2007. 720 p.

14. GS1 EPC™ Radio-Frequency Identity Protocols Generation-2 UHF RFID, available at: http://www.gs1.org/sites/default/files/docs/epc/Gen2_Protocol_Standard.pdf.

15. Rao C. R. & Toutenburg H. Linear Models: Least Squares and Alternatives. 2nd ed. NY, USA, Springer, 1999. 427 p.

КОСТРОМИНОВ Александр Михайлович – доктор техн. наук, профессор, triak@grozon.spb.ru; РАХМАНИН Сергей Анатольевич – аспирант, beethovin@mail.ru; СМИРНОВ Богдан Олегович – студент, smirnov@vklay.ru; *ТЮЛЯНДИН Олег Николаевич – аспирант, tyulyandin@vklay.ru (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I).