

# ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ

Н. А. Верзун<sup>1</sup>, М. О. Колбанёв<sup>1\*</sup>, А. А. Шамин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> СПбГЭУ, Санкт-Петербург, 191023, Российская Федерация

<sup>2</sup> НГИЭУ, Княгинино, 606340, Российская Федерация

\* Адрес для переписки: mokolbanev@mail.ru

## Аннотация

В статье строится математическая модель всепроникающей сенсорной сети, позволяющая оценивать энергетические характеристики процесса информационного взаимодействия сенсорных элементов.

## Ключевые слова

беспроводная сенсорная сеть, энергоэффективность, топология сети, мощность радиосигнала.

## Информация о статье

УДК 621.391

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 18.12.16, принята к печати 28.02.17.

**Ссылка для цитирования:** Верзун Н. А., Колбанёв М. О., Шамин А. А. Энергетическая эффективность взаимодействия в беспроводных сенсорных сетях // Информационные технологии и телекоммуникации. 2017. Том 5. № 1. С. 88–96.

# THE ENERGY EFFICIENCY OF COOPERATION IN WIRELESS SENSOR NETWORKS

N. Verzun<sup>1</sup>, M. Kolbanev<sup>1\*</sup>, A. Shamin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> SPbGEU, St. Petersburg, 191023, Russian Federation

<sup>2</sup> NGIEU, Knyaginino, 606340, Russian Federation

\* Corresponding author: mokolbanev@mail.ru

**Abstract**—In the article mathematical model of pervasive sensor networks, allowing to estimate the energy characteristics of the process of information interaction of sensor elements.

**Keywords**—Wireless sensor network, energy efficiency, network topology, capacity of a radio signal.

**Article info**

Article in Russian.

Received 18.12.16, accepted 28.02.17.

**For citation:** Verzun N., Kolbanev M., Shamin A.: The Energy Efficiency of Cooperation in Wireless Sensor Networks // Telecom IT. 2017. Vol. 5. Iss. 1. pp. 88–96 (in Russian).

## **Введение**

Сенсорная сеть представляет собой совокупность аппаратного и программного обеспечения. Основным устройством подобной сети является сенсор – электронное изделие миниатюрного размера с автономным питанием, способное отслеживать какие-либо физические характеристики вещей и/или их внешнего окружения [1, 2]. Области применения подобных сетей различны и в зависимости от них сенсоры могут быть: акустические, сейсмические, магнитные, температуры, влажности, освещенности, инфракрасные, оптические, электромагнитные и др. Взаимодействие сенсоров интернета вещей друг с другом, с глобальной инфраструктурой осуществляется посредством самоорганизующейся и устойчивой к отказам всепроникающей сенсорной сети – USN (*Ubiquitous Sensor Networks*). Способность USN «покрывать» значительные территории позволяет осуществлять непрерывный мониторинг различных показателей объектов физического мира, и контролировать таким образом, например, экосистему, жизненное пространства человека, систему энергоснабжения, материальное производство и т. п. [3].

Несмотря на длительную историю применения сенсорных сетей – первые упоминания о них можно встретить в литературе с 90-х гг. XX в. [4] – окончательная концепция архитектуры, построения и принципов функционирования подобных сетей до сих пор не создана. Реализуемые сегодня на практике решения с применением беспроводных сетей определяются, прежде всего, предметной областью, зависят от конкретных условий эксплуатации, сценариев работы сенсоров, требований заказчиков к функционалу, надежности, стоимости, энергоэффективности и пр. Реальные задачи различных сфер человеческой деятельности накладывают свои ограничения на размер устройств, надежность, вандалозащищенность, стоимость и пр.

## **Стандарты БСС**

Для реализации БСС, как правило, не подходят «классические» технологии беспроводных локальных сетей (такие, например, как Wi-Fi, Wi-MAX) т. к. при их создании ставились другие задачи, они ориентированы на высокоскоростную передачу больших объемов информации и не вполне подходят для БСС прежде всего из-за высокого энергопотребления, поддерживаемых топологий. Существует множество промышленных стандартов, регламентирующих архитектуру, принципы построения и функционирования БСС [2, 3]. Ниже в таблице 1 представлены примеры:

Таблица 1.  
Стандарты беспроводных сетей

Наименование стандарта	Используемая частота	Базовые топологии	Примеры сфер применения
Bluetooth Low Energy	2400–2483,5 МГц	Звезда, точка-точка	Удаленное управление различными объектами, спортивные датчики, сотовые телефоны, ПК
ZigBee	2400–2483,5 МГц	Звезда, mesh, точка-точка, кластерное дерево	Автоматизация жилья, медицинское оборудование, интеллектуальные транспортные системы
СТРИЖ	868,7–869,2 МГц	Звезда	Автоматизация в сфере ЖКХ, охранные системы, сельское хозяйство
LoRa	868,7–869,2 МГц	Звезда, mesh, точка-точка	Энергетика, транспорт, сельское хозяйство, контроль здоровья человека

Как видно из таблицы 1 существующие стандарты ориентируются на применение нелицензируемых диапазонов частот ISM – (*Industrial, Scientific, Medical*) [3]. В Российской Федерации диапазоны, выделенные для нелицензируемого использования, определяются Государственной комиссией по радиочастотам (ГКРЧ) в таблице 2 приведены некоторые из них.

Таблица 2.  
Диапазоны радиочастот, выделенные для нелицензируемого использования

Полоса частот, МГц	Максимально допустимая мощность излучения передатчика, мВт	Документ, регламентирующий использование
433,075–434,790	10	Приложение 1 к решению ГКРЧ от 7 мая 2007 г. № 07-20-03-001
868,7–869,2	25	Приложение 11 к решению ГКРЧ от мая 2007 г. № 07-20-03-001
2400–2483,5	100	Приложение 2 к решению ГКРЧ от 7 мая 2007 г. № 07-20-03-001
5150–5350	100	Приложение 12 к решению ГКРЧ от 7 мая 2007 г. № 07-20-03-001

### Проблемы энергосбережения в сетях будущего

Экологический фактор – один из 4 основополагающих факторов, влияющих на создание сетей будущего согласно рекомендации Y.3001<sup>1</sup> [5]. Главной задачей при разработке сетей будущего является – применение энергосберегающих технологий. В соответствии с Y.3021 снизить негативное воздействие на окружающую среду при использовании FN можно двумя способами<sup>2</sup> [6].

<sup>1</sup> Y.3001. Objectives and Design Goals of ITU-T Future Networks. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.3001-201105-I>.

<sup>2</sup> Y.3021. Framework of Energy Saving for Future Networks. URL: <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.3021-201201-I>.

Во-первых, путем применения FN как инструмента, позволяющего снизить негативное воздействие других областей экономики на окружающую среду. Это, например, «умные» энергосети smart grid, динамично и рационально распределяющие электрическую мощность между потребителями. Во-вторых, путем уменьшения негативного влияния непосредственно самих FN на окружающую среду. Базовый принцип сетей будущего – экологическая чистота. Их характерная черта – снижение потребления всеми компонентами сети. Согласно Y.3021 внутри FN различают три уровня (устройств, оборудования, сети), каждому из которых соответствуют свои технологии энергосбережения<sup>3</sup> [6].

Применительно к компонентам БСС: на уровне конечных узлов (сенсоров), сетевого оборудования это технологии создания и функционирования электронных устройств (БИС, ЗУ), а на уровне организации сети, технологии, применимые во всей БСС – это, например, алгоритмы: формирования, сжатия, передачи блоков данных, выбора маршрутов для передачи и т. д. Авторы статьи уже не раз в своих работах обращались к теме энергосберегающих сетевых технологий [5]. Так, например, в [6] рассматривалось влияние объемов метаданных, в [7] процедур сжатия, а в [8] механизмов помехоустойчивого кодирования на затрачиваемую энергию в процессе информационного взаимодействия. Данная статья посвящена исследованию влияния параметров беспроводной сенсорной сети на затрачиваемую энергию при передаче блоков данных [5, 6, 7, 8].

### **Топология mesh сенсорных сетей**

В таблице 1 приведены возможные топологии БСС. Наиболее популярная и перспективная топология – mesh (*Mesh Topology*) называемая также ячеистой сетью. Это распределенная одноранговая сеть, в которой каждый узел обладает равными правами. В mesh-сетях используются различные протоколы маршрутизации (гибридный протокол маршрутизации *Hybrid Wireless Mesh Protocol*(HWMP), *Dynamic Source Routing* (DSR) и др.). Они отличаются по режимам работы, критериям выбора оптимального пути передачи и др.

Так, например, гибридный протокол маршрутизации HWMP поддерживает два возможных режима: реактивный и проактивный. В первом случае построение таблиц для маршрутизации трафика в узлах mesh-сети происходит непосредственно перед его передачей (т. е. по запросу). В случае же применения проактивного режима осуществляется регулярное обновление информации в маршрутных таблицах всех узлов сети. При выборе оптимального пути для передачи данных между узлами mesh-сети применяются следующие критерии: длина пути (или количество промежуточных узлов), надежность передачи, задержка при передаче, пропускная способность и стоимость передачи трафика по маршруту.

### **Математическая модель**

Объект исследования – автономная система мониторинга состояния экосистемы, представляющая собой беспроводную сенсорную mesh-сеть. БСС включает совокупность объектов ( $N$  – число объектов БСС), расположенных

<sup>3</sup> Там же.

на территории конечной площади и образующих пуассоновское поле точек, т. е. объекты на рассматриваемой плоскости в любой момент времени распределены равномерно с плотностью  $\mu$  [ $1/m^2$ ], попадают в неперекрывающиеся области независимым образом и появляются на плоскости по одиночке (а не парами, тройками и т. д.). Рассматривается передача блока данных от одного объекта к другому объекту БСС. Допустим, что при выборе маршрута передачи блока данных каждый узел передает его ближайшему (по расстоянию) от него «соседу». Тогда в общем случае необходимо будет осуществить  $z+1$  передачу блока данных (где  $z$  число промежуточных узлов,

$$z = \overline{0, N - 2}.$$

С учетом принятых обозначений и того, что для простейшего пуассоновского поля распределение расстояний между его соседними точками подчиняется закону Рэлея [9] функция распределения расстояния  $r$  [м] от фиксированного объекта БСС до ближайшего к нему другого объекта [10] в любой момент времени имеет следующий вид:

$$F_1(r) = 1 - e^{-\pi r^2 \mu}.$$

Плотность распределения случайной величины  $r$ :

$$f_1(r) = 2\pi\mu r e^{-\pi r^2 \mu}. \quad (1)$$

Рассмотрим случайную величину  $y$ , связанную с  $r$  следующей зависимостью  $y = r^2$  (или обратная зависимость:  $r = \sqrt{y}$ ). Для  $y$  плотность распределения  $f_2(y)$  согласно [11] задается выражением

$$f_2(y) = f_1(\sqrt{y}) * |(\sqrt{y})'|; f_2(y) = \pi\mu e^{-\pi\mu y}, \quad (2)$$

где  $f_1(r)$  определяется (1).

Затухание радиосигнала в пространстве определяется известной формулой Г. Фрииса (*Harald Friis*) [12]:

$$\frac{P_{\text{пер}}}{P_{\text{пр}}} = C_{\text{пер}} C_{\text{пр}} \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2, \quad (3)$$

где  $C_{\text{пер}}$  – коэффициент усиления передающей антенны,  $C_{\text{пр}}$  – коэффициент усиления приёмной антенны,  $P_{\text{пер}}$  – мощность радиосигнала на передающей антенне [Вт] (без учёта потерь),  $P_{\text{пр}}$  – мощность радиосигнала на принимаемой антенне [Вт] (без учёта потерь);  $r$  – расстояние между антеннами объектов БСС в метрах;  $\lambda$  – длина волны [м], передаваемого радиосигнала.

Мощность радиосигнала на передающей антенне объекта БСС из (3) определяется следующим образом:

$$P_{\text{пер}} = \frac{P_{\text{пр}} \lambda^2 C_{\text{пр}} C_{\text{пер}}}{(4\pi)^2 r^2}.$$

Требуемая мощность сигнала на передающей антенне ( $P_{\text{пер}}$ ), в предположении, что мощность радиосигнала на приемной антенне ( $P_{\text{пр}}$ ) постоянна, случайная величина, зависящая от квадрата расстояния ( $y = r^2$ ) между взаимодействующими объектами.

$$P_{\text{пер}} = \frac{A}{y}; \quad A = \frac{P_{\text{пр}} \lambda^2 C_{\text{пр}} C_{\text{пер}}}{(4\pi)^2} = \text{const.} \quad (4)$$

Обозначим как  $k(P_{\text{пер}})$  – плотность распределения случайной величины  $P_{\text{пер}}$ . Из (4):  $y = A/P_{\text{пер}}$ . Тогда, согласно [11], зная плотность распределения случайной величины  $y$  (см. выражение (2)) можно написать  $k(P_{\text{пер}})$  следующим образом

$$k(P_{\text{пер}}) = f_2\left(\frac{A}{P_{\text{пер}}}\right) * \left|\left(\frac{A}{P_{\text{пер}}}\right)'\right|;$$

$$k(P_{\text{пер}}) = \frac{\mu\pi A}{P_{\text{пер}}^2} e^{-\frac{\mu\pi A}{P_{\text{пер}}}}, \quad (5)$$

Из (5) функция распределения случайной величины  $P_{\text{пер}}$ :

$$F(P_{\text{пер}}) = \int_0^{P_{\text{пер}}} k(P_{\text{пер}}) dP_{\text{пер}};$$

$$F(P_{\text{пер}}) = e^{-\frac{\mu\pi A}{P_{\text{пер}}}} \quad (6)$$

Математическое ожидание случайной величины мощности, затрачиваемой радиопередатчиком фиксированного объекта при передаче блока до ближайшего к нему другого объекта в БСС, будет определяться следующим образом:

$$m_1 = \overline{P_{\text{пер}}} = \int_0^{+\infty} P_{\text{пер}} k(P_{\text{пер}}) dP_{\text{пер}} = \int_0^{+\infty} P_{\text{пер}} \frac{\mu\pi A}{P_{\text{пер}}^2} e^{-\frac{\mu\pi A}{P_{\text{пер}}}} dP_{\text{пер}}$$

или  $\overline{P_{\text{пер}}}$ :

$$\overline{P_{\text{пер}}} = \Gamma\left(0, \frac{\mu\pi A}{P_{\text{пер}}}\right) \mu\pi A, \quad \overline{P_{\text{пер}}} = \mu\pi A \int_z^{\infty} \frac{e^{-t}}{t} dt; z = \mu\pi A / P_{\text{пер}},$$

где  $\Gamma\left(0, \frac{\mu\pi A}{P_{\text{пер}}}\right)$  гамма-функция от двух аргументов.

В беспроводной сенсорной сети топологии mesh для того, чтобы передать данные от объекта  $i$  к  $j$  необходимо переслать их в общем случае через  $z$  промежуточных узлов ( $z = \overline{0, N - 2}$ ). Математическое ожидание общей мощности сигнала радиопередатчиков узлов БСС при передаче блока от одного фиксиру-

ванного узла другому через  $z$  промежуточных узлов (т. е. будет  $z + 1$  передача), будет определяться следующим образом:

$$\overline{P_{\text{пер}}^{\text{общ}}} = (z + 1) * \overline{P_{\text{пер}}}.$$

### Численный расчет

Применяя вышеприведенные выражения проведем численный расчет и анализ влияния параметров рассматриваемой БСС и узлов на требуемую мощность радиосигнала на передающей антенне объекта БСС. А именно в данной статье был осуществлен расчет и построены графики: рис. 1 – плотности распределения  $P_{\text{пер}}$  по выражению (5) и рис. 2 – функции распределения  $P_{\text{пер}}$  по выражению (6). Для рис. 1 и 2 выбраны разные диапазоны значений  $P_{\text{пер}}$ .

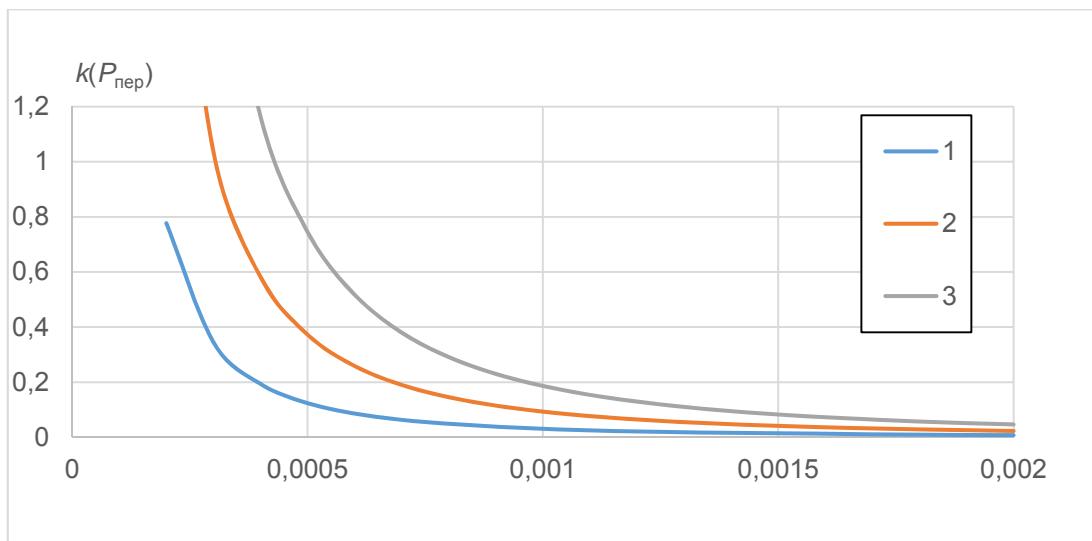


Рис. 1. Плотность распределения  $P_{\text{пер}}$  для различных значений плотности распределения узлов БСС (1 –  $\mu = 0,1$ ; 2 –  $\mu = 0,3$ ; 3 –  $\mu = 0,6$ )

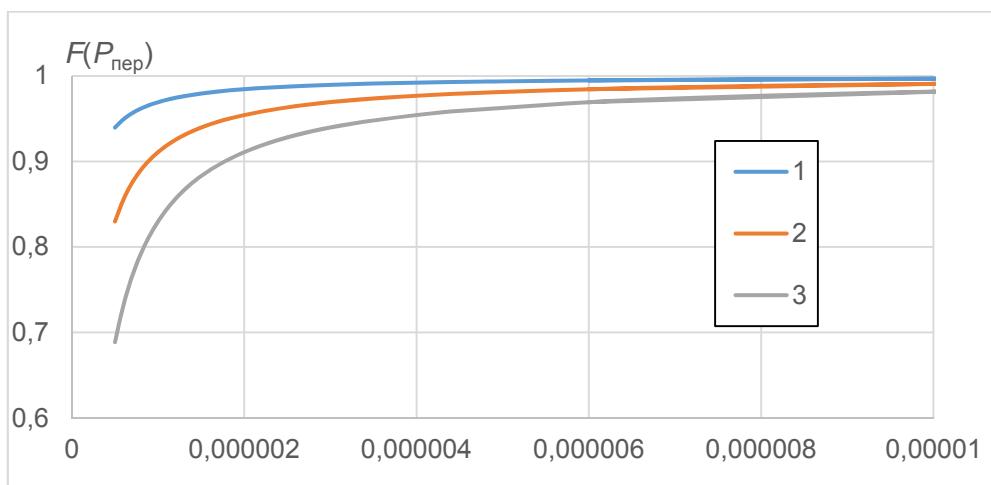


Рис. 2. Функция распределения  $P_{\text{пер}}$  для различных значений плотности распределения узлов БСС (1 –  $\mu = 0,1$ ; 2 –  $\mu = 0,3$ ; 3 –  $\mu = 0,6$ )

Численный расчет проводился для следующих значений исходных данных:  $\lambda = 0,125$  м – длина волны, передаваемого радиосигнала соответствует частоте сигнала  $f = 2,4$  ГГц);  $C_{\text{пер}} = 1$  – коэффициент усиления передающей антенны;  $C_{\text{пр}} = 1$  – коэффициент усиления приёмной антенны;  $P_{\text{пр}} = 0,1$  мВт – мощность радиосигнала на принимаемое антенне;  $\mu = 0,1; 0,3; 0,6$  1/м<sup>2</sup> – плотность распределения узлов БСС.

## **Заключение**

Важнейшей характеристикой беспроводных сенсорных сетей является их энергоэффективность, которая определяется не только элементной базой, но и алгоритмами работы. Полученная модель позволяет оценивать энергетические характеристики сети для разных протоколов информационного взаимодействия.

## **Литература**

1. Кучерявыи А. Е., Прокопьев А. В., Кучерявыи Е. А. Самоорганизующиеся сети. СПб.: Любович. 2011. 310 с. ISBN 978-5-86983-318-1.
2. Росляков А. В., Ваняшин С. В., Гребешков А. Ю., Самсонов М. Ю. Интернет-вещей. Самара: ПГУТИ. 2014. 340 с.
3. Верзун Н. А., Колбанёв М. О., Омельян А. В. Введение в инфокоммуникационные технологии и сети Future Networks. СПб.: СПбГЭУ. 2016. 51 с. ISBN 978-5-7310-3640-5.
4. Рагозин Д. В. Моделирование синхронизированных сенсорных сетей // Проблеми програмування. 2008. № 2–3. Спеціальний випуск. С. 721–729 с.
5. Колбанёв М. О., Пойманова Е. Д., Татарникова Т. М. Физические ресурсы информационного процесса сохранения данных // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2014. Т. 57. № 9. С. 38–42.
6. Колбанёв М. О., Верзун Н. А., Омельян А. В. Об энергетической эффективности сетей пакетной передачи данных // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2014. Т. 57. № 9. С. 42–46.
7. Воробьев А. И., Колбанёв А. М., Колбанёв М. О. Модель оптимизации энергопотребления умными вещами // Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2015. № 7. С. 46–49.
8. Верзун Н. А., Колбанёв М. О., Колбанёв А. М. Энергетическая эффективности помехоустойчивого кодирования в беспроводных сетях интернета вещей // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 2. С. 143–149.
9. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Задачи и упражнения по теории вероятностей. М.: Академия. 2003. 448 с. ISBN 5-7695-1054-4.
10. Кучерявыи А. Е., Нуриллоев И. Н., Парамонов А. И., Прокопьев А. В. Обеспечение связности беспроводных сенсорных узлов гетерогенной сети // Информационные технологии и телекоммуникации. 2015. № 1 (9). С. 115–122. URL: <http://www.sut.ru/doc/nauka/review/1-15.pdf>
11. Давенпорт В. В., Рут В. Л. Введение в теорию случайных сигналов и шумов. М.: Издательство иностранной литературы. 1960. 467 с.
12. Уоллес Р. Максимальная дальность связи по радиоканалу в системе: как этого добиться? // Новости электроники. 2015. № 11. С. 3–13.

## **References**

1. Koucheryavy, A., Prokopiev, A., Koucheryavy, E. Self-Organizing Networks. SPb.: Lubavich. 2011. 310 p. ISBN 978-5-86983-318-1.
2. Roslyakov, A., Vanyashin, S., Grebeshkov, A., Samsonov, M. Internet of Things. Samara: PGUTI. 2014. 340 p.
3. Verzun, N., Kolbanev, M., Omelyan, A. Introduction to Infocommunication Technologies and Future Networks. SPb.: SPbGEU. 2016. 51 p. ISBN 978-5-7310-3640-5.

4. Ragozin, D. Modeling Synchronized Sensor Networks // Problemy programmirovaniya. 2008. No. 2–3. Special Issue. pp. 721–729.
5. Kolbanev, M., Poyanova, E., Tatarnikova, T. Physical Resources of Information Process of Data Saving // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie. 2014. Vol. 57. No. 9. pp. 38–42.
6. Kolbanev, M., Verzun, N., Omelyan, A. On Energy Efficiency of Packet Transmission Networks // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie. 2014. Vol. 57. Iss. 9. pp. 42–46.
7. Vorobiov, A., Kolbanev, A., Kolbanev, M. Model Energy Optimization Clever Things // Izvestiya SPbGETU "LETI". 2015. Vol. 7. pp. 46–49.
8. Verzun, N., Kolbanev, M., Kolbanev, A. Energy Efficiency of Error-Correcting Coding in Wireless Networks of the Internet of Things // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie. 2017. Vol. 60. No. 2. pp. 143–149.
9. Venttsel', E., Ovcharov, L. Applied Problems in Probability Theory. M.: Academiya. 2003. 448 p. ISBN 5-7695-1054-4.
10. Koucheryavy, A., Nurilloev, I., Paramonov, A., Prokopiev, A. Provision of Connectivity of Wireless Sensor Nodes in Heterogeneous Network // Telecom IT. 2015. Vol. 1 (9). pp. 115–122. URL: <http://www.sut.ru/doc/nauka/review/1-15.pdf>
11. Davenport, W., Root, W. An Introduction to the Theory of Random Signals and Noise. Wiley-IEEE Press. 1987. 408 p. ISBN-13: 978-0879422356.
12. Wallace, R. Maximum Radio Range Distance in the System: How to Achieve this? // Novosti elektroniki. 2015. No. 11. pp. 3–13.

**Верзун Наталья Аркадьевна**

– кандидат технических наук, доцент, СПбГЭУ,  
Санкт-Петербург, 191023, Российская Федерация,  
verzun.n@unecon.ru

**Колбанёв Михаил Олегович**

– доктор технических наук, профессор, СПбГЭУ,  
Санкт-Петербург, 191023, Российская Федерация,  
mokolbanev@mail.ru

**Шамин Алексей Анатольевич**

– кандидат экономических наук, доцент, НГИЭУ,  
Княгинино, 606340, Российская Федерация,  
ngiei-spo@mail.ru

**Verzun Natalia**

– Candidate of Engineering Sciences, Docent, SPbGEU,  
St. Petersburg, 191023, Russian Federation, ver-  
zun.n@unecon.ru

**Kolbanev Mikhail**

– Doctor of Engineering Sciences, Professor SPbGEU,  
St. Petersburg, 191023, Russian Federation,  
mokolbanev@mail.ru

**Shamin Alexsey**

– Candidate of Engineering Sciences, Associate  
Professor, NGIEU, Knyaginino, 606340, Russian  
Federation, ngiei-spo@mail.ru