

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЯХ

Н. А. Верзун¹, М. О. Колбанёв^{1*}, А. А. Шамин²

¹ СПбГЭУ, Санкт-Петербург, 191023, Российская Федерация

² 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. Verzun¹, M. Kolbanev^{1*}, A. Shamin²

¹ SPbGEU, St. Petersburg, 191023, Russian Federation

² 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 пространство 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, вандализационность, 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.3001¹ [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 способами² [6].

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

² 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 энергосбережения³ [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

³ 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 μ [1/м²], 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; λ – 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 $\overline{P_{\text{пер}}}$:

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

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 фиксиро-

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 $P_{\text{пер}}$.

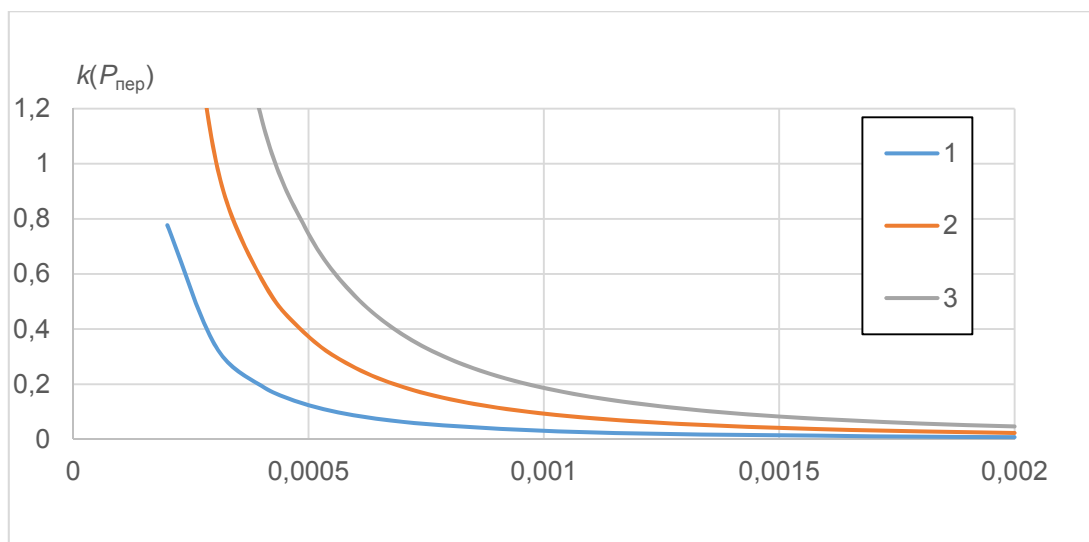


Рис. 1. Плотность распределения $P_{\text{пер}}$ для различных значений плотности распределения узлов БСС (1 – $\mu = 0,1$; 2 – $\mu = 0,3$; 3 – $\mu = 0,6$)

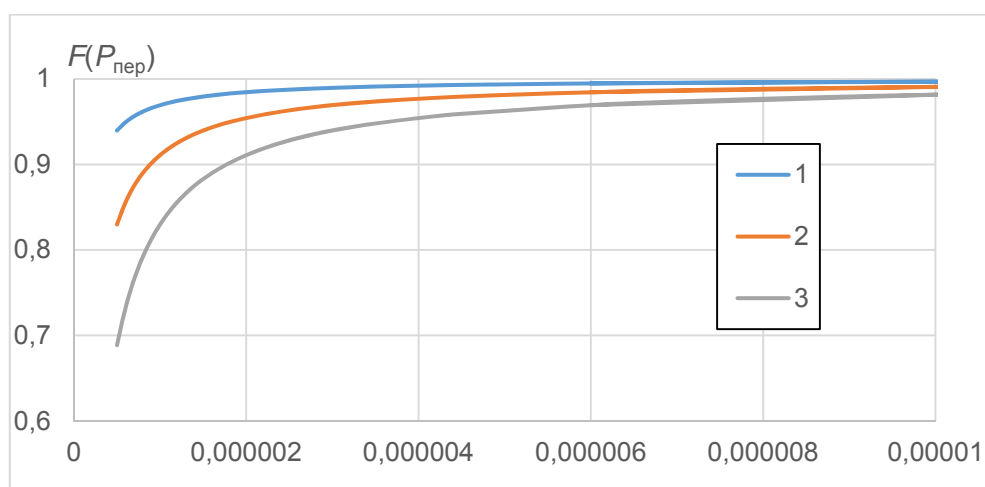


Рис. 2. Функция распределения $P_{\text{пер}}$ для различных значений плотности распределения узлов БСС (1 – $\mu = 0,1$; 2 – $\mu = 0,3$; 3 – $\mu = 0,6$)

Численный расчет проводился для следующих значений исходных данных: $\lambda = 0,125$ м – длина волны, передаваемого радиосигнала соответствует частоте сигнала $f = 2,4$ ГГц); $C_{пер} = 1$ – коэффициент усиления передающей антенны; $C_{пр} = 1$ – коэффициент усиления приёмной антенны; $P_{пр} = 0,1$ мВт – мощность радиосигнала на принимаемое антенне; $\mu = 0,1; 0,3; 0,6$ 1/м² – 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. Кучерявый А. Е., Прокопьев А. В., Кучерявый Е. А. Самоорганизующиеся сети. СПб.: Любавич. 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., Омелян 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 // Проблемы программирования. 2008. № 2–3. Специальный выпуск. 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., Омелян 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 эффективность 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. Кучерявый А. Е., Нуриллов 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/doci/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., Poymanova, E., Tatarnikova, T. Physical Resources of Information Process of Data Saving // Izvestiya vysshih uchebnyh 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 vysshih uchebnyh 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 vysshih uchebnyh zavedeniy. Priborostroenie. 2017. Vol. 60. No. 2. pp. 143–149.
9. Venttsel', E., Ovcharov, L. Applied Problems in Probability Theory. M.: Akademiya. 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/doci/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