

ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ И СТАНДАРТОВ RFID СИСТЕМ

Н. А. Верзун¹, Д. М. Воробьева^{2*}, А. М. Колбанёв³, М. О. Колбанёв¹

¹ СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, 197376, Российская Федерация

² СПбГУТ, Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

³ АО «ЭР-Телеком Холдинг», Санкт-Петербург, 194352, Российская Федерация

* Адрес для переписки: vorobyeva.dm@spbgu.ru

Аннотация

Предмет исследования. Данная статья посвящена обзору современных технологий построения систем RFID идентификации, являющихся неотъемлемой частью интернета вещей. Рассматриваются общие характеристики RFID систем и их сравнение с другими методами идентификации, классификация технологий построения меток, особенности активных, полупассивных и пассивных RFID меток с чипом, вопросы стандартизации RFID технологий. **Метод.** В основе исследования лежит анализ технических решений, принимаемых производителями RFID меток и разработчиков соответствующих стандартов. **Основной результат.** Полученный обзор в отличии от известных выявляет основные особенности пассивных и активных меток с чипом, что позволяет принимать рациональные решения при выборе элементной базы систем RFID идентификации. **Практическая значимость** полученных результатов состоит в создании научно обоснованных рекомендаций по созданию и планированию RFID систем и их использования при построении приложений интернета вещей.

Ключевые слова

Интернет вещей, идентификация объектов, RFID система, стандартизация RFID технологий.

Информация о статье

УДК 004.087

Язык статьи – русский.

Поступила в редакцию 11.01.18, принята к печати 28.02.18.

Ссылка для цитирования: Верзун Н. А., Воробьева Д. М., Колбанёв А. М., Колбанёв М. О. Обзор технологий и стандартов RFID систем // Информационные технологии и телекоммуникации. 2018. Том 6. № 1. С. 1–11.

REVIEW OF TECHNOLOGIES AND STANDARDS OF RFID SYSTEMS

N. Verzun¹, D. Vorobeva^{2*}, A. Kolbanev³, M. Kolbanev¹

¹ SPbETU "LETI", St. Petersburg, 197376, Russian Federation

² SPbSUT, St. Petersburg, 193232, Russian Federation

³ ER-Telecom Holding JSC, St. Petersburg, 194352, Russian Federation

* Corresponding author: vorobyeva.dm@spbgut.ru

Abstract—Research subject. This article is devoted to a review of modern technologies for building RFID identification systems, which are an integral part of the Internet of things. The general characteristics of RFID systems and their comparison with other identification methods, the classification of tagging technologies, the features of active, semi-passive and passive RFID tags with a chip, the issues of standardization of RFID technologies are considered. **Method.** The study is based on an analysis of technical solutions adopted by manufacturers of RFID tags and developers of relevant standards.

Core results. The obtained survey, unlike the known ones, reveals the main features of passive and active tags with a chip, which allows making rational decisions when choosing the element base of RFID identification systems. **Practical relevance.** The practical significance of the results obtained is the creation of scientifically grounded recommendations on the creation and planning of RFID systems and their use in the construction of Internet applications of things.

Keywords—Internet of things, identification of objects, RFID system, standardization of RFID technologies.

Article info

Article in Russian.

Received 11.01.18, accepted 28.02.18.

For citation: Verzun N., Vorobeva D., Kolbanev A., Kolbanev M.: Review of technologies and standards of RFID systems // Telecom IT. 2018. Vol. 6. Iss. 1. pp. 1–11 (in Russian).

Введение

Интернет вещей не может развиваться без развития базовых для него технологий [1, 2], к числу которых, в частности, относятся:

- технологии идентификации, которые позволяют отличить умную вещь от любой другой вещи [3]. В реальном мире идентификатором может служить любой материальный параметр, в виртуальном – кодовое обозначение или сетевой адрес терминала, в цифровой экономике – сочетание одного и другого;
- технологии всепроникающих сенсорных сетей, которые используют радиосигналы для организации взаимодействия между вещами [4]. Главными критериями выбора технологии ставятся энергетические и пространственные характеристики сенсорных полей, а не только битовая скорость передачи данных;
- технологии энергоснабжения умных вещей¹ [5], которые обеспечивают их продолжительную автономную работу (использование миниатюрных источников

¹ Radio Frequency IDentification (RFID). URL: [http://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:RFID\(Radio_Frequency_IDentification,%D0%A0%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D0%BE_%D0%A7%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%82%D0%BD%D0](http://www.tadviser.ru/index.php/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F:RFID(Radio_Frequency_IDentification,%D0%A0%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D0%BE_%D0%A7%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%BE%D1%82%D0%BD%D0)

энергии, тепла человеческого тела, кинетической энергии от ходьбы или нажатия на клавиши, беспроводной подзарядки от электромагнитных сигналов и др.);

- сенсорные технологии для измерения характеристик вещей и их внешнего окружения, которые основаны на естественных законах физики (механика, колебания и волны, молекулярная физика и термодинамика, электродинамика, оптика, теория относительности, квантовая физика и др.), химии, биологии, географии, астрономии и геологии.

- технологии построения вычислителей разной степени интеграции, которые необходимы для реализации алгоритмов обработки данных (микропроцессоры, микроконтроллеры, микрочипы, устройства без аналого-цифрового преобразования и др.) и др.

Центральное место в этом ряду занимают технологии идентификации умных вещей. Следует различать их идентификацию в реальном и виртуальном мирах. В реальном мире наиболее распространены системы на основе:

- штрихового кода, представляющего данные на плоскости в визуальном формате, пригодном для чтения компьютером, в виде полосок и пробелов между ними, точечного узора, концентрических окружностей и т. п.;

- биометрических признаков, основанных на уникальности характеристик человеческого тела (папиллярный узор пальца, форма кисти руки, узор радужной оболочки, параметры голоса, черты лица, термограмма лица (схема кровеносных сосудов), фрагменты генетического кода и др.);

- радиометок, излучающих данные в форме радиосигналов [6].

В виртуальном мире для идентификации используют различные сетевые адреса. В 2016 г. МСЭ начал разработку стандартов для идентификации умных вещей в интернете вещей под названием: «Процедуры идентификации устройств интернета вещей, обеспечивающие безопасность, конфиденциальность и доверие к системам интернета вещей»: *«В рекомендации разрабатываются методы и сценарии опознания как простых устройств, основанных на RFID, NFC и ПАВ технологиях, так и более сложных устройств на базе микроконтроллеров или микропроцессоров»*.

Хорошая система идентификации должна обеспечивать защиту от клонирования и других кибератак.

Целым рядом преимуществ (табл. 1 см. ниже) по сравнению с другими подходами обладает радиочастотная идентификация объектов (RFID – *Radio Frequency IDentification*), которая использует RFID метку (транспондер, приемо-передатчик, RFID систему, RFID тег) для дистанционного считывания или записи данных при помощи радиосигналов.

В целом, они ускоряют процесс идентификации, не требуют специального расположения маркера относительно устройства считывания, более надежны и долговечны.

Недостатки RFID систем:

- зависимость от электромагнитных помех,
- взаимные коллизии в группе соседних меток,
- более высокая стоимость метки.

Таблица 1.

	RFID системы	Штрих код
Одновременная идентификация группы объектов	+	-
Высокая скорость чтения данных	+	-
Идентификация без прямого контакта с объектом	+	-
Идентификация скрытых объектов	+	-
Больший объем информации на метке	+	-
Возможность перезаписи части информации	+	-
Идентификация движущихся объектов	+	-
Идентификация металлических объектов	+	+
Устойчивость к механическим воздействиям	+	-
Устойчивость к воздействиям внешней среды: температурным, химическим, радиоактивным, влаге и др.	+	+
Возможность введения в тело животного	+	-
Защищенность от подделки	+	-
Долговечность	+	+
и др.		

RFID метки являются внешними устройствами по отношению к помечаемым предметам и подвержены кибератакам.

Область применения RFID систем чрезвычайно широка²:

- системы контроля и управления доступом (СКУД),
- сортировка, регистрация предметов (багаж, почтовые отправления, биоматериал и т. п.),
- логистика и цепочки поставок,
- профилактическое обслуживание и контроль целостности технических систем,
- идентификация беспилотных транспортных средств,
- организация массовых мероприятий,
- управление складом, проведение инвентаризации,
- отслеживание животных,
- защита от подделок и много др.

Наряду с самими RFID метками неотъемлемыми элементами RFID систем являются считыватели, связанные с RFID метками по радиоканалу, и информационные системы для управления всеми процессами.

² Там же.

Создание RFID систем является сложным процессом, который объединяет многие научные области знания:

- электротехнику и микроэлектронику – разработка физических устройств, материалов, фотолитография, технологический процесс и др.;
- электродинамику и радиотехнику – электромагнитное взаимодействие считывателя с меткой, антенны, схемотехника и др.;
- связь и радиосвязь – передача данных, преобразование сигналов, корреляция, модуляция, линейное кодирование, помехи, обнаружение и коррекция ошибок [6] и др.;
- множественный доступ – разделяемая среда передачи, коллизии, методы доступа [8, 9]: детерминированные, случайные, пространственные и корреляционные алгоритмы и др.

Объем мирового рынка в 2017 г. достиг $\sim \$10$, к 2024 г. должен приблизиться к $\sim \$27$ млрд. С 1943 г. по 2014 г. было изготовлено 26 млрд RFID меток, из которых 25 млрд – это пассивные метки.

Классификация RFID меток строится по различным признакам:

- по исполнению (кремневые, на поверхностных акустических волнах),
- по способу хранения данных (с чипом (кремниевая технология), без чипа (на поверхностных акустических волнах – ПАВ)),
- по электропитанию (активные (с излучающим контуром), полуактивные (выделено питание для чипа), пассивные (резонирующие)),
- по способу использования (только считывание идентификатора (RO – Read Only), однократная запись данных в память и их многократное считывание (WORM – *Write Once Read Many*), многократные запись/считывание из памяти (RW – *Read and Write*)),
- по частоте (низкочастотный (LF) до 150 КГц, среднечастотный (HF) 13,56 МГц, высокочастотный (UHF) 850–950 МГц, 2,45–5 ГГц).

Метки с чипом (кремниевая технология) дают возможность интерактивного взаимодействия со считывателем. Это самая важная их особенность. Чип используется для хранения и обработки данных, модуляции и демодуляции радиосигналов, для выполнения протоколов взаимодействия с другими устройствами системы при помощи команд типа «сообщи заводской номер», «передай (запиши) байт из (в) память с адресом A », «задержки передачу на время t » «перейди в (выди из) режим(а) молчания» и т. п.

Пассивные RFID метки с чипом получают энергию для функционирования от электрического тока, индуцируемого в антенне электромагнитным сигналом считывателя. Обработку входного и выработку ответного сигнала обеспечивает кремниевый КМОП-чип. Они используются при создании самонаклеивающихся этикеток (стикеров), проездных бесконтактных карт, ключей для прохода в здания и др. В больших количествах изготавливаются в виде бумажных или пластиковых рулонов. Чип может содержать от сотен байт до нескольких Кбайт памяти.

Выбор КМОП (комплементарная структура металл-оксид-полупроводник) – полупроводниковой технологии построения интегральных микросхем объясняется близким к нулю энергопотреблением в статическом состоянии. Энергия требуется только для переключения состояний транзисторов во время вычислений. Современное оборудование позволяет изготавливать миллионы таких чипов за час.

Активная RFID метка содержит однокристальный микроконтроллер с разнообразными цифровыми и аналоговыми портами ввода-вывода, радио приемо-передатчик, кварцевые генераторы для синтеза радиочастот и для часов реального времени, большой объем памяти, а также дополнительные компоненты, такие как устройства управления, кнопки, датчики для измерения температуры, влажности, давления, вибраций и др. физических параметров помеченного объекта и окружающей его среды и т. п. Батарея электропитания должна служить в течении нескольких (до 10) лет.

Программное обеспечение, прошитое в микроконтроллер, способно реализовывать сложные протоколы взаимодействия и со считывателем, и с другими метками.

Радио интерфейс на физическом и канальном уровнях часто использует стандарт IEEE 802.15.4, который является базовым для многих сетевых технологий интернета вещей.

Собственный источник питания позволяет активным меткам генерировать выходной сигнал большого уровня для увеличения дальности уверенного считывания до сотен метров и использования метки в таких средах как вода, тело животного или человека, или металл (например, в контейнерах).

Используют два частотных диапазона:

- среднечастотный (HF), который обеспечивает дальность действия от 1 см до 0,2 м и использует модуляцию нагрузки сигнала несущей частоты (*Load Modulation* – нагрузочная модуляция);
- высокочастотный (UHF), который может использоваться на расстояниях от 1 до 10 м и передает сигнал методом модуляции отраженного сигнала несущей частоты (*Backscattering Modulation* – модуляция обратного рассеяния).

Габариты метки зависят от размера антенны, а размер антенны – от длины волны несущей, для которой она создана.

Поскольку активная метка получает энергию, необходимую для обработки команд считывателя и формирования ответного сигнала, от встроенной батареи, а пассивная метка – по радиолинии от устройства считывания, между ними существуют значительные различия при производстве и эксплуатации (табл. 2).

Таблица 2.

Пассивные метки	Активные метки
Для производства требуется стандартное технологическое оборудование микроэлектроники, низкая стоимость маркера	Достаточно сложные схемотехнические решения построения маркера, высокая стоимость
Источник питания не требуется	Источник питания ограничивает срок эксплуатации
Имеют малый размер, самый большой элемент – это антенна	Значительные габариты и вес, связанные с наличием источника питания
Дальность считывания обычно находится в пределах от десятков сантиметров до единиц метров	Дальность считывания определяется мощностью источника питания, может составлять несколько сотен метров
Ограниченные возможности для перезаписи или перезапись невозможна	Могут быть сделаны перезаписываемыми с сохранением дополнительных данных

Пассивные метки	Активные метки
Сохраняют работоспособность в широком температурном диапазоне, не подвержены воздействию радиации	Имеют ограниченный температурный диапазон, воздействие радиации приводит к отказу в работе
Некоторые типы маркеров обнаруживаются нелинейными локаторами	Могут быть легко обнаружены аппаратурой радиоконтроля

Полупассивные метки, в отличии от активных, используют батарею питания для встроенных датчиков и накопления данных в микрочипе при нахождении метки вне поля считывателя. Считывание и передача данных осуществляется также, как и у пассивных меток с чипом.

Большое значение имеет стандартизация RFID технологий. В Стандартах RFID³ можно найти ссылки на все стандарты, включая ГОСТы РФ.

Стандарты ISO в области RFID относятся к интерфейсам и протоколам взаимодействия (табл. 3).

Цель деятельности организации EPC Global – международной некоммерческой организации в области идентификации продукции – ориентирован на создание таких стандартов, которые позволяют на практике идентифицировать любой объект в цепи поставок товаров компаний всего мира. Физический уровень обмена данными основан на ISO/IEC 18000-6. Разработано два совместимых поколения стандарта: Gen1 и Gen2.

Таблица 3.

Стандарт	Основное содержание
ISO 11784	Радиочастотная идентификация животных. Структура информации
ISO 11785	Радиочастотная идентификация животных. Техническая концепция
ISO/IEC 14443	Карты идентификации. Бесконтактные карты с интегральной схемой. Proximity-карты
ISO/IEC 15693	Карты идентификации. Бесконтактные карты с интегральной схемой. Vicinity-карты
ISO/IEC 18001	Инф. технология. Технология AIDC. RFID для управления объектами. Требования к приложениям
ISO/IEC 18000-1	Интерфейс радиосвязи (часть 1). Общие параметры каналов связи для разрешенных частотных диапазонов
ISO/IEC 18000-2	Интерфейс радиосвязи (часть 2). Параметры интерфейса радиосвязи с частотой до 135 кГц
ISO/IEC 18000-3	Интерфейс радиосвязи (часть 3). Параметры интерфейса радиосвязи на частоте 13,56 МГц
ISO/IEC 18000-4	Интерфейс радиосвязи (часть 4). Параметры для интерфейса радиосвязи на частоте 2,45 ГГц

³ Стандарты RFID. URL: <http://uhf-rfid.info/technology/standards>

Стандарт	Основное содержание
ISO/IEC 18000-5	Интерфейс радиосвязи (часть 5). Параметры для интерфейса радиосвязи на частоте 5,8 ГГц
ISO/IEC 18000-6	Интерфейс радиосвязи (часть 6). Параметры для интерфейса радиосвязи в диапазоне частот 860–930 МГц
ISO/IEC 18000-6	Интерфейс радиосвязи (часть 6). Параметры для интерфейса радиосвязи на частоте 433,92 МГц
ISO/IEC 15960	Синтаксис данных. Требования к прикладному сообщению.
ISO/IEC 15961	RFID для управления объектами. Протокол передачи данных – прикладной интерфейс
ISO/IEC 15962	RFID для управления объектами. Протокол правил кодировки данных и логических функций памяти
ISO/IEC 15963	RFID для управления объектами. Уникальная идентификация радиочастотной метки

Вводит 5 функциональных групп (классов) меток:

Класс 0. Группа пассивных меток для идентификации объекта (*Passive Identity Tag*). Эти метки содержат только так называемый «электронный код продукта» (*Electronic Product Code*, EPC) в неизменяемом виде и использующий проверку при помощи циклического избыточного кода (CRC – *Cyclic redundancy check*) для обнаружения ошибок.

Класс 1. Группа пассивных меток с функциональными возможностями (*Passive Functional Tag*). Эта большая группа меток содержит все метки, имеющие какие либо дополнительные функции, отличающие их от первой группы. Примером таких функций могут быть перезаписываемый EPC, шифрование данных и т. п.

Класс 2. Группа «полупассивных» меток (*Semi-Passive Tag*). К этой группе были отнесены все метки, использующие дополнительно источник питания. При этом основным источником питания должен являться считыватель, а точнее, излучаемая им энергия.

Класс 3. Группа активных меток (*Active Tag*). Эти метки содержат встроенный источник питания, полностью обеспечивающий метку необходимой энергией вне зависимости от считывателя.

Класс 4. Группа активных RFID меток (*RFID Tag*). Эти метки не только содержат встроенный источник питания, но и набор определенной логики, позволяющей метке обмениваться данными с такой же меткой или обычным считывателем.

Области применения стандартов приведены в табл. 4.

В стандарте Gen2⁴ память меток содержит 4 банка, каждый из которых хранит данные определенного вида, адресуется и обрабатывается специальными командами протокола:

⁴ Radio-Frequency Identity Protocols Class-1 Generation-2 UHF RFID Protocol for Communications at 860 MHz – 960 MHz Version 1.0.9. URL: https://www.gs1.org/sites/default/files/docs/epc/Gen2_Protocol_Standard.pdf

Таблица 4.

Наименование стандарта	Область применения
Стандарты, определенные для меток UHF	Схемы шифрования номера объекта EAN.UCC Global Trade (GTIN®). Стандартизованные данные EAN.UCC Serial Shipping Container Code (SSCC®), EAN.UCC Global Location Number (GLN®), EAN.UCC Global Returnable Asset Identifier (GRAI®), EAN.UCC Global Individual Asset Identifier (GIAI®), General Identifier (GID).
Спецификации класса 0 UHF	Коммуникационный протокол и интерфейс класса 0 (900 МГц)
Спецификации класса 1 UHF	Коммуникационный протокол и интерфейс класса 1 (860–930 МГц)
Спецификации класса 1 UHF (EPC Class1 Gen2)	Коммуникационный протокол и интерфейс класса 1 (860–930 Гц), основанный на первом поколении класса 1 ⁵
Спецификации класса 1 HF	Коммуникационный протокол и интерфейс класса 1 (13,56 МГц)
Спецификации протокола обмена считывателя	Протокол обмена между считывателями и программным обеспечением, поддерживающим спецификации EPC Global ⁶
Спецификация Savant	Спецификация для служб Savant, выполняющих запросы приложений в сетях EPC Global
Спецификация ONS	Спецификация ONS для службы именования объектов сети EPC
Спецификация PML	Спецификация набора словарей для языка, используемого в сетях EPC, обеспечивающего стандартизированный формат данных протокола обмена

1. Reserved Memory (00) хранит:

- KILL-пароль (32 бита), при поступлении которого из считывателя метка «убивается» и не может быть восстановлена;
- ACCESS-пароль (32 бита), без знания которого доступ к метке не возможен.

2. Electronic Product Code (01, EPC) хранит уникальный код, который позволяет однозначно идентифицировать один объект, помеченный меткой, от любого другого объекта. Может иметь длину 96 бит, 240 бит и др. Этот банк не защищен от записи и заполняется пользователями.

3. Transponder ID (10, TID) хранит идентификаторы производителя метки, модели используемого чипа и самой метки (*Serialized TID*), которые могут использоваться для защиты метки от подделки. Все вместе образуют гарантированно уникальный код. На этапе производства банк TID защищается от перезаписи.

4. User Memory (11). Это не обязательный банк, имеющий размер от 32 до 512 бит и предназначенный для хранения любой информации пользователя.

Содержание паролей KILL и ACCESS по отдельности, а также банков EPC и User Memory совместно, может быть защищено от коррекции временно или навсегда.

Стандарты на метки без чипа на сегодняшний день отсутствуют.

⁵ Radio-Frequency Identity Protocols Class-1 Generation-2 UHF RFID Protocol for Communications at 860 MHz – 960 MHz Version 1.0.9. URL: https://www.gs1.org/sites/default/files/docs/epc/Gen2_Protocol_Standard.pdf

⁶ TI UHF Gen2 Protocol Reference Guide. URL: <http://www.keytex.ru/files/UHF-ProtocolRefGuide.pdf>

Проведенный анализ технических решений, принимаемых производителями RFID меток и разработчиков соответствующих стандартов позволил выявить основные особенности пассивных и активных меток с чипом, которые должны лежать в основе решений при выборе элементной базы систем RFID идентификации.

Литература

1. Кучеряный А. Е. Интернет Вещей // Электросвязь. 2013. № 1. С. 21–24.
2. Верзун Н. А., Колбанев М. О., Омельян А. В. Введение в инфокоммуникационные технологии и сети Future Networks. СПб.: СПбГЭУ. 2016. 51 с.
3. Тельтевская В. А., Зеленов В. В., Шустов Н. И., Кулик В. А., Киричек Р. В., Маколкина М. А. Идентификация устройств Интернета Вещей с помощью технологий дополненной реальности // Информационные технологии и телекоммуникации. 2017. Т. 5. № 4. С. 64–70.
4. Верзун Н. А., Колбанёв М. О., Шамин А. А. Энергетическая эффективность взаимодействия в беспроводных сенсорных сетях // Информационные технологии и телекоммуникации. 2017. Т. 5. № 1. С. 88–96.
5. Воробьев А. И., Колбанёв А. М., Колбанёв М. О. Зеленые информационные технологии // Ученые записки Международного банковского института. 2015. Вып. 12. С. 153–164.
6. Верзун Н. А., Колбанев А. М., Колбанев М. О. Энергетическая эффективность помехоустойчивого кодирования в беспроводных сетях интернета вещей // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 2. С. 143–149.
7. Верзун Н. А., Колбанев М. О., Омельян А. В. RFID-технологии для эффективности и безопасности документооборота // Технологии информационно-экономической безопасности. 2016. С. 44–51.
8. Верзун Н. А., Колбанев М. О., Омельян А. В. Регулируемый множественный доступ в беспроводной сети умных вещей // Омский научный вестник. Серия: Информатика, вычислительная техника и управление. 2016. № 4 (148). С. 147–151.
9. Верзун Н. А., Колбанев М. О., Коршунов И. Л., Микадзе С. Ю. Основы моделирования информационных систем множественного доступа. СПб.: СПбГЭУ. 2015. 138 с.

References

1. Koucheryavy A The Internet of Things // Electrosvyaz'. 2013. No. 1. pp. 21–24.
2. Verzun N., Kolbanyov M., Omelyan A. Introduction to Infocommunication Technologies and Future Networks. SPb.: SPbGEU. 2016. 51 p.
3. Teltevskaya V., Zelenov V., Shustov N., Kulik V., Kirichek R., Makolkina M.: Identification of the Internet of Things Devices with Augmented Reality Technologies // Telecom IT. 2017. Vol. 5. Iss. 4. pp. 64–70 (in Russian).
4. Verzun N., Kolbanyov M., Shamin A.: The Energy Efficiency of Cooperation in Wireless Sensor Networks // Telecom IT. 2017. Vol. 5. Iss. 1. pp. 88–96 (in Russian).
5. Vorobyov A., Kolbanyov A., Kolbanyov M. Green IT // Scientific proceedings of International Banking Institute. 2015. Iss. 12. pp. 153–164.
6. Verzun N., Kolbanyov A., Kolbanyov M. Energy Efficiency of Error-Correcting Coding in Wireless Networks of the Internet of Things // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie. 2017. Vol. 60. Iss. 2. pp. 143–149.
7. Verzun N., Kolbanyov M., Omelyan A. RFID Technology for Effectiveness and Safety of Document Turnover // Information and Economic Security Technologies. 2016. pp. 44–51.
8. Verzun N., Kolbanyov M., Omelyan A. Controlled Multiple Access in Wireless Network of Smart Things // Omskiy nauchnyi vestnik. Seriya: Informatika, vychislitel'naya tekhnika I upravlenie. 2016. Vol. 4 (148). pp. 147–151.
9. Verzun N., Kolbanyov M., Korshunov I., Mikadze S. Fundamentals of Modeling Multiple-Access Information Systems. SPb.: SPbGEU. 2015. 138 p.

Верзун Наталья Аркадьевна

– кандидат технических наук, доцент,
СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, 197376,
Российская Федерация, verzun.n@unecon.ru

Воробьева Дарья Михайловна

– преподаватель, колледж телекоммуникаций
СПбГУТ, Санкт-Петербург, 199053, Российская
Федерация, vorobyeva.dm@spbgut.ru

Колбанев Алексей Михайлович

– руководитель отдела по техническому
сопровождению клиентов, АО «ЭР-Телеком
Холдинг», Санкт-Петербург, 194352,
Российская Федерация,
kolbanev@gmail.com

Колбанев Михаил Олегович

– доктор технических наук, профессор,
СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, 197376,
Российская Федерация, mokolbanev@mail.ru

Verzun Natalia

– Candidate of Engineering Sciences, Associate
Professor, SPbSETU "LETI", St. Petersburg, 197376,
Russian Federation, verzun.n@unecon.ru

Vorobeva Darya

– Lecturer, College of telecommunications SPbSUT,
St. Petersburg, 199053, Russian Federation,
vorobyeva.dm@spbgut.ru

Kolbanev Alexey

– Head of customer support department, ER-Telecom
Holding JSC, St. Petersburg, 194352,
Russian Federation, kolbanev@gmail.com

Kolbanev Mikhail

– Doctor of Engineering Sciences, Full Professor,
SPbSETU "LETI", St. Petersburg, 197376,
Russian Federation, mokolbanev@mail.ru