

Алгоритм роя пчел выбора головных узлов кластеров беспроводной сенсорной сети

Т. М. Татарникова^{1✉}, Ф. Бимбетов¹, Е. В. Горина²

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, Санкт-Петербург, Россия
✉ tm-tatarn@yandex.ru

Аннотация. В статье обсуждается актуальная задача энергоэффективного взаимодействия сенсорных узлов в беспроводной сенсорной сети. Обозначены ограничения беспроводных сенсорных сетей, основным из которых является требование низкого энергопотребления, от которого зависит срок их службы. Ограничения требуют сокращать число операций при организации взаимодействия узлов сети. Одним из действенных подходов является кластеризация создаваемого сетью сенсорного поля, поскольку сокращается длина маршрута доставки данных. В статье предложен алгоритм роя пчел, позволяющий в начале каждого цикла работы беспроводной сенсорной сети определять не только глав кластеров, но и потенциальных глав кластеров, которые могут стать ими в следующих раундах сети. Главы кластеров и потенциальные главы кластеров выбираются по метрике евклидова расстояния и уровню остаточной энергии. Показано, что в отличие от известного алгоритма LEACH и его версий в алгоритме роя пчел фаза выбора головного узла кластера становится ненужной по крайней мере в течение одного цикла, а сенсорные узлы таким образом избавляются от некоторых вычислений, связанных с выбором главы кластера. Проведенные имитационные эксперименты свидетельствуют об эффективности предложенного алгоритма роя пчел при выборе глав кластеров беспроводной сенсорной сети.

Ключевые слова: беспроводная сенсорная сеть, энергопотребление, кластеризация беспроводной сенсорной сети, сенсорный узел, глава кластера, срок службы сети, алгоритм роя пчел

Для цитирования: Татарникова Т. М., Бимбетов Ф., Горина Е. В. Алгоритм роя пчел выбора головных узлов кластеров беспроводной сенсорной сети // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2022. Т. 15, № 3. С. 15-22
<https://doi.org/10.32603/2071-8985-2022-15-3-15-22>.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

A Swarm of Bees Algorithm for Head Nodes Selection of Wireless Sensor Network Clusters

T. M. Tatarnikova^{1✉}, F. Bimbetov¹, E. V. Gorina²

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

² Saint-Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Saint Petersburg, Russia
✉ tm-tatarn@yandex.ru

Abstract. The article discusses the actual problem of energy-efficient interaction of sensor nodes in a wireless sensor network. The limitations of wireless sensor networks are indicated, the main of which is the requirement of low power consumption, on which the service life of the network depends. Restrictions dictate to reduce the

number of operations when organizing the interaction of network nodes. One of the effective approaches is the clustering of the sensory field created by the network, since the length of the data delivery route is reduced. The article proposes an algorithm for a swarm of bees that allows at the beginning of each cycle of the wireless sensor network to determine not only the heads of clusters, but also potential heads of clusters that can become them in the next rounds of the network. Cluster heads and potential cluster heads are chosen according to the Euclidean distance metric and the level of residual energy. It is shown that, unlike the well-known LEACH algorithm and its versions, in the bee swarm algorithm, the phase of choosing the head node of the cluster becomes unnecessary for at least one cycle, and the sensor nodes thus get rid of some calculations associated with choosing the head of the cluster. The conducted simulation experiments testify to the effectiveness of the proposed bee swarm algorithm in choosing the heads of wireless sensor network clusters.

Keywords: wireless sensor network, power consumption, sensor network clustering, sensor node, cluster head, network lifetime, bee swarm algorithm

For citation: Tatarnikova T. M., Bimbetov F., Gorina E. V. A Swarm of Bees Algorithm for Head Nodes Selection of Wireless Sensor Network Clusters // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2022. Vol. 15, no. 3. P. 15-22. <https://doi.org/10.32603/2071-8985-2022-15-3-15-22>.

Введение. Развитие беспроводных технологий и микроэлектромеханических датчиков определило образование беспроводных сенсорных сетей (БСС). БСС состоит из одной или нескольких принимающих удаленных базовых станций и множества маломощных сенсорных узлов (СУ), каждый из которых оснащен исполнительным механизмом, датчиком, вычислителем и приемопередатчиком [1]. Беспроводная сенсорная сеть разворачивается в интересующей области с целью организации непрерывного контроля физической среды.

Все популярные в настоящее время приложения типа мониторинга здоровья, охранного наблюдения, интеллектуального транспорта и другие реализуются средствами БСС [2]–[5].

Одно из самых важных ограничений сенсорных узлов – это требование низкого энергопотребления. Сенсорный узел, как правило, содержит ограниченную по емкости батарею в качестве источника питания. От энергопотребления зависит срок службы БСС [6], который может быть измерен с помощью следующих параметров:

- числа активных узлов – количества узлов, которые еще функционируют и имеют энергию для работы;
- временем «смерти» первого узла – продолжительностью функционирования БСС тех пор, пока уровень остаточной энергии первого СУ не упадет до критического состояния.
- коэффициентом доставки пакетов – отношением числа доставленных адресату пакетов к числу отправленных.

Таким образом, если протоколы традиционных сетей нацелены на достижение высоких показателей качества обслуживания (Quality of Ser-

vice, QoS), то протоколы сенсорных сетей должны быть ориентированы в первую очередь на энергосбережение. Как правило, протоколы БСС должны иметь встроенные компромиссные механизмы, которые дают возможность продления срока службы сети за счет более низкой пропускной способности или более высокой задержки передачи измерений от СУ на базовую станцию.

Помимо низкого энергопотребления есть и другие строгие ограничения для сенсорных узлов, например СУ должен:

- работать в условиях высокой объемной плотности;
- иметь низкую себестоимость и быть однократным;
- быть автономным и работать без присмотра;
- быть адаптивным к окружающей среде.

Энергия сенсорных узлов расходуется на прием и передачу данных, их обработку, вычисление маршрута и т. д. [7]. Таким образом, выбор способа информационного взаимодействия относится к актуальным научным задачам организации беспроводной сенсорной сети. Необходимы новые алгоритмы, позволяющие сократить число операций при функционировании сенсорных узлов, тем самым увеличивая продолжительность жизненного цикла БСС и выполнение ее основных функций. Исследования последних пяти лет посвящены разработке протоколов беспроводных сенсорных сетей, удовлетворяющих этим требованиям.

Описание процесса кластеризации беспроводной сенсорной сети. Практика эксплуатации и моделирования БСС [8], [9] показывает, что энергоэффективным способом доставки данных от СУ на базовую станцию служит ретрансляция через головной узел кластера, а не напрямую (рис. 1).

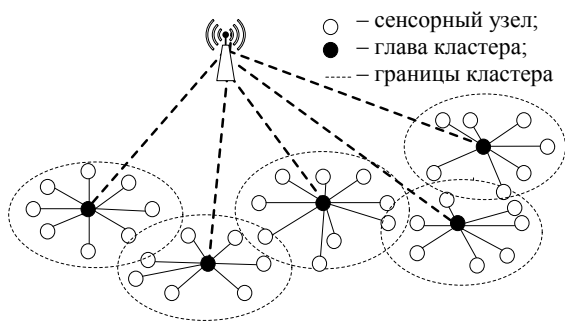


Рис. 1. Кластеризованная структура беспроводной сенсорной сети

Fig. 1. Clustered wireless sensor network structure

Беспроводная сенсорная сеть строится как совокупность кластеров, на которые разбивается создаваемое сенсорное поле. Количество кластеров теоретически не ограничено, что позволяет масштабировать размер БСС.

В каждом раунде работы БСС последовательно выполняются следующие действия (рис. 2):

- выбор главы кластера – головного узла кластера, выполняющего функции ретранслятора измеренных данных от сенсорных узлов на базовую станцию, включая агрегацию, отсеивание, форматирование данных, поступающих от множества СУ;

- формирование кластера вокруг главы кластера на основе мощности сигнала RSS (Received Signal Strength), дБм, отправляемого главой кластера всем сенсорным узлам. Мощность сигнала RSS позволяет измерить расстояние от СУ до головного узла;

- передача данных: глава кластера широковещательной рассылкой доставляет своим сенсорным узлам расписание отправки данных, после чего каждое сенсорное устройство передает данные в своем временном окне согласно методу TDMA (Time Division Multiple Access – множественный доступ с разделением по времени), что гарантирует отсутствие коллизий передачи данных [10];

- агрегация данных – это процедура объединения данных, полученных от сенсорных узлов. Если данные некорректны, то они отсеиваются. На базовую станцию данные передаются в требуемом для дальнейшей обработки формате;

– переход в спящий режим, который характеризуется сниженным потреблением энергии СУ и наступает после периода активности при полной функциональности БСС.

В практике организации работы БСС распространение получил алгоритм адаптивной кластеризации с низким потреблением энергии LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy), основанный на поддержке баланса расхода энергии [11]. Алгоритм выбора головного узла кластера по алгоритму LEACH приведен на рис. 3.

Выбор главы кластера осуществляется по случайному закону: на каждом i -м СУ независимо от других СУ генерируется случайное число $z_i \in [0,1]$, $i = \overline{1, N}$, и одновременно вычисляется некоторое пороговое значение

$$Th_i = \frac{Q}{1 - Q(r \bmod i)}, \quad (*)$$

где Q – априорная вероятность допустимого количества кластеров на контролируемом БСС пространстве; r – номер текущего раунда; i – порядковый номер сенсорного узла.

СУ назначается главой кластера при $z_i < Th_i$, иначе он назначается рядовым узлом кластера.

Продолжительность одного цикла включает $1/Q$ раундов. В течение цикла один и тот же СУ не может быть выбран главой кластера более одного раза. В новом цикле процедура выбора головных узлов повторяется.

Описание предлагаемого алгоритма поиска глав кластеров на перспективу. Предлагается не в начале раунда, а вначале цикла по метрике евклидова расстояния и уровню остаточной энергии определять главу кластера и близкие к нему сенсорные узлы, т. е. потенциальные главы кластера, которые могут стать ими в следующих раундах сети. Таким образом, в отличие от алгоритма LEACH и его версий при таком подходе фаза выбора головного узла кластера становится ненужной по крайней мере в течение одного цикла, а сенсорные узлы избавляются от некоторых вычислений, связанных с выбором главы кластера.

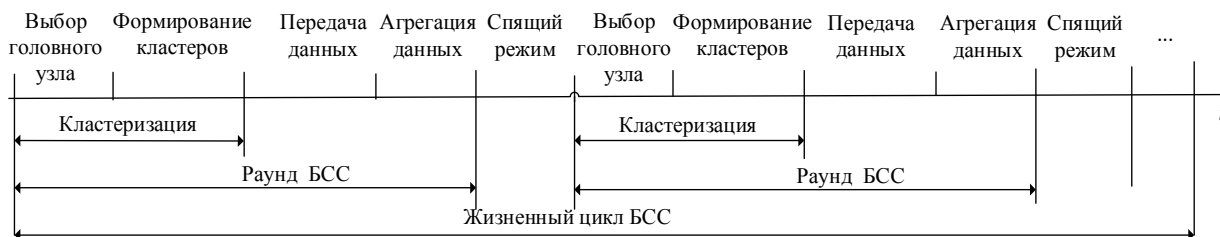


Рис. 2. Циклическое функционирование беспроводной сенсорной сети
 Fig. 2. Cyclic wireless sensor network operation

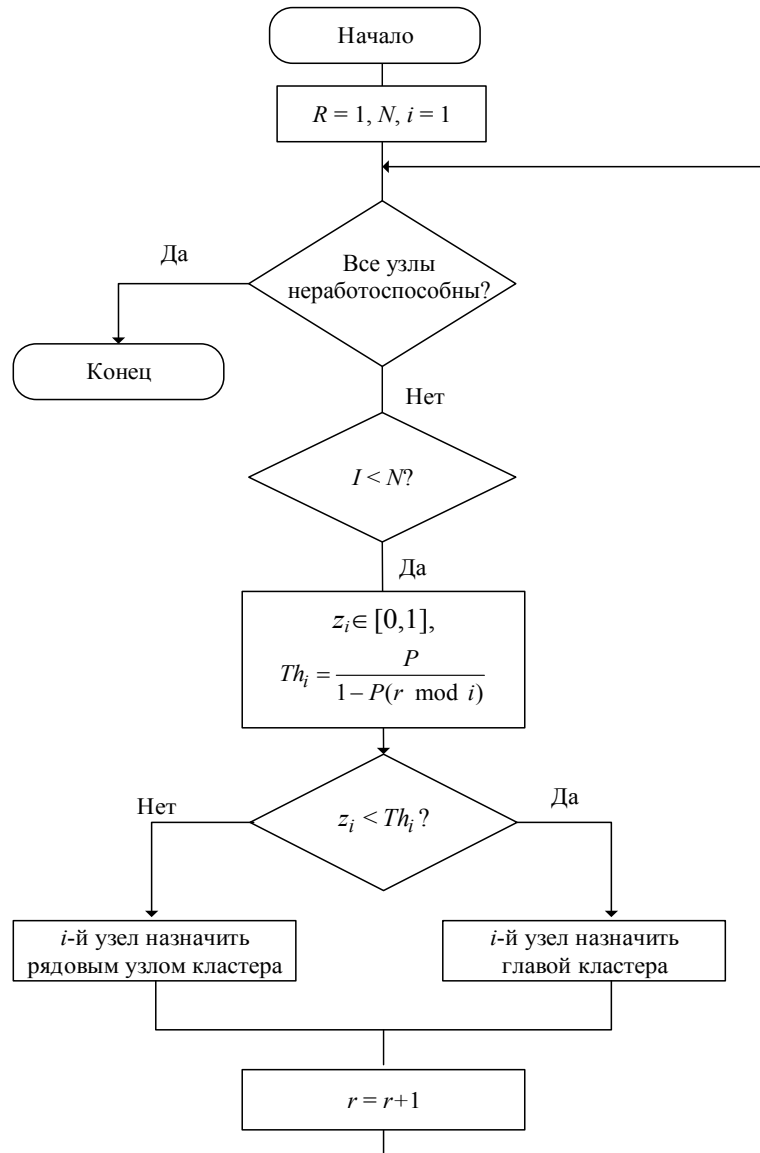


Рис. 3. Блок-схема алгоритма LEACH выбора главы кластера БСС
 Fig. 3. Block diagram of the algorithm for choosing the WSN cluster head node

Предлагаемый алгоритм основан на *роевом интеллекте* – наборе алгоритмов, направленных на изучение и описание коллективного поведения децентрализованной самоорганизующейся системы, к числу которых относятся и БСС.

Системы роевого интеллекта состоят из множества отдельных элементов, которые взаимодействуют между собой и с окружающей средой. Все элементы – простые агенты с небольшим набором выполняемых операций, в совокупности создающие единый роевой интеллект, способный решать задачи поисковой оптимизации. Каждое перемещение агента характеризуется определенным положением в исследуемой области, для которого вычисляется значение целевой функции и на основе которого принимается решение об ис-

следовании близлежащей области. В данном алгоритме есть несколько преимуществ:

- возможность разделения на параллельные процессы;
- высокая скорость работы;
- нахождение значения целевой функции и близлежащих значений.

В предлагаемом алгоритме агентами служат пчелы-разведчики и пчелы-фуражиры, которые перемещаются в выбранной области целевой функции. Основной целью пчелиной колонии является поиск нектара – оптимального значения целевой функции.

Сначала на поиски наибольшего скопления нектара отправляются несколько пчел-разведчиков, которые исследуют местность и выявляют

наиболее медоносные участки. Затем пчелы-разведчики возвращаются в улей и сообщают пчелам-фуражирам, где необходимо провести сбор нектара. Пчелы-фуражиры, следуя за пчелой-разведчиком, не прилетают в одну точку, а распределяются в некоторой области, которая располагается недалеко от исходного места скопления нектара. Таким образом, пчелы-фуражиры могут найти и запомнить места как наиболее, так и наименее перспективные. В таблице приведены термины алгоритма роя пчел в приложении к задаче оптимизации.

Адаптация терминов алгоритма роя пчел к задаче оптимизации
Adaptation of the terms of the bee swarm algorithm to the optimization problem

Термин алгоритма роя пчел	Термин задачи оптимизации
Нектар	Экстремум целевой функции
Рой пчел	Массив всех координат исследуемой плоскости
Окрестность поиска нектара	Окрестность выбранной точки
Пчелы-разведчики	Выбранные случайным образом точки исследуемой плоскости
Лучшие участки	Точки, в которых значение целевой функции достигает экстремума
Перспективные участки	Точки, в которых значение целевой функции близко к значению лучших участков
Пчелы-фуражиры	Количество точек в окрестности лучших и перспективных участков

Алгоритм состоит из следующих шагов:

1. Ввод исходных данных:
 - число пчел-разведчиков X ;
 - число лучших участков B ;
 - число перспективных участков P ;
 - радиус окрестности R , в которой пчела выполняет поиск;
 - область исследования (координаты плоскости) или длина a и ширина b исследуемой области;
 - значение шага передвижения для исследования плоскости Δ .

2. Отправка пчел-разведчиков – случайный выбор X точек на исследуемой плоскости: $X = \text{random.uniform}(a, b)$.

3. Оценка полученных значений целевой функции X точек и выбор лучших B и перспективных P участков.

4. Случайный выбор l точек на лучших участках и p точек на перспективных участках ($l > p$), окрестности каждой точки задаются координатами с радиусом R .

5. Проверка на пересечение областей и вхождение выбранных точек каждого типа в окрестности друг друга. Для этого используется метрика евклидова расстояния: $d(x, y) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$, $d > R$; оно должно быть больше, чем заданное значение R для определения области, иначе определяем границы окрестности по двум координатам.

6. Исследование окрестностей каждой из l и p выбранных точек в поиске лучших и перспективных участков.

7. Повтор шагов 2–6 до тех пор, пока не сработает условие останова.

Анализ результатов. Для сравнения работы двух алгоритмов: LEACH и роя пчел, разработана имитационная модель БСС. Она реализована на языке Python 3.6 и включает модули, соответствующие временной диаграмме жизненного цикла БСС, приведенной на рис. 2. Имитационная модель является продолжением работы [12]. Распределение сенсорных устройств в каждом новом жизненном цикле происходило случайно в границах, заданных координатами сенсорного поля. Моделирование алгоритма LEACH выполнено в соответствии с выражением (*), формирование кластеров – на основе мощности сигнала RSS.

Моделирование выполнялось при следующих исходных данных:

- $N = 100$;
- $Q = 5\%$;
- $a = 100$ м, $b = 100$ м;
- размер пакета данных $L = 32$ бит;
- энергия, расходуемая для сбора данных, $E_a = 5$ нДж;
- остаточная энергия сенсорного узла $E = 0.5$ Дж;
- $R = 20$ м;
- радиус распространения сигнала $RSS = 2R$;
- продолжительность одного раунда 1 с;
- скорость передачи данных 9600 бит/с;
- энергия передачи одного бита данных $E_b = 50$ нДж.

На рис. 4 представлена гистограмма сравнения продолжительности функционирования БСС до первого погибшего сенсорного узла для трех случаев: некластеризованной БСС, кластеризованной БСС с поиском главы кластера по алгоритму LEACH и кластеризованной БСС с поиском главы кластера по алгоритму роя пчел. Результаты пока-

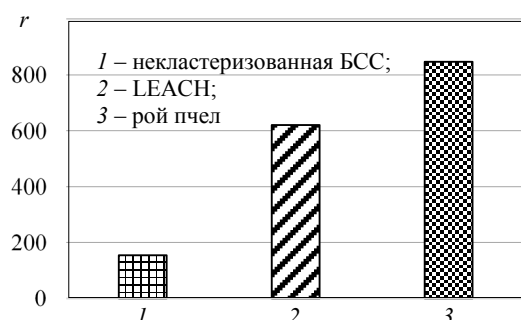


Рис. 4. Продолжительность функционирования БСС до первого погибшего сенсорного узла
Fig. 4. Duration of WSN functioning until the first dead sensory node

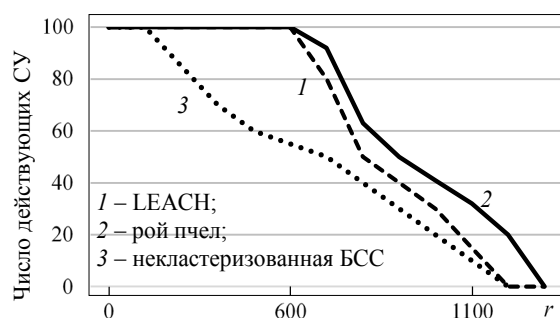


Рис. 5. Изменение числа сенсорных узлов БСС с течением времени
Fig. 5. Change the number of WSN nodes over time

зывают, что у некластеризованной БСС первый узел погиб в 167-м раунде, т. е. к третьей минуте работы БСС, тогда как для кластеризованной БСС с поиском главы кластера по алгоритму LEACH это произошло на 645-м раунде, т. е. на одиннадцатой минуте работы БСС, а для БСС с поиском главы кластера по алгоритму роя пчел на 847-м раунде – на пятнадцатой минуте работы сети. Приблизительно такой же баланс сохраняется, если увеличивать априорную вероятность допустимого количества кластеров.

На рис. 5 демонстрируется потеря сенсорных узлов с течением времени функционирования БСС. В целом кластеризованная БСС имеет более продолжительный жизненный цикл в сравнении с

некластеризованной БСС, а выбор главы кластера по алгоритму роя пчел позволяет экономить энергию и, соответственно, увеличивать продолжительность жизненного цикла БСС. Отметим, что с увеличением числа сенсорных узлов в кластере и числа раундов в цикле функционирования БСС эта экономия будет только расти.

В этой части статьи авторы интерпретируют полученные результаты в соответствии с поставленными задачами исследования. Они могут объяснять полученные результаты на основе своего опыта и базовых знаний, приводя несколько возможных объяснений.

Заключение. Выбор способа информационного взаимодействия является одной из актуальных научных задач при организации беспроводной сенсорной сети. Анализ исследований в этом направлении свидетельствует о необходимости новых алгоритмов, позволяющих сократить число операций при функционировании сенсорных узлов, снижающих расход энергии, тем самым увеличивая продолжительность жизненного цикла БСС. Одним из таких алгоритмов когда-то стал алгоритм кластеризации беспроводной сенсорной сети, позволивший сократить длину маршрута доставки данных и передать часть вычислительных процедур главе кластера.

В статье предложено в начале каждого цикла, а не раунда выбирать не только главу кластера на текущий раунд, но и на перспективу всех раундов, входящих в цикл функционирования БСС. Как показали результаты моделирования, выбор глав кластеров на перспективу позволяет сократить расход энергии за счет ненужности некоторых вычислений, связанных с выбором главы кластера.

Предложенный алгоритм роя пчел по выбору главы кластера можно рекомендовать при выборе способов взаимодействия узлов на ранних стадиях проектирования беспроводной сенсорной сети в целях рационального расходования энергии.

Список литературы

1. Кучерявый А. Е., Бородин А. С., Киричек Р. В. Сети связи 2030 // Электросвязь. 2018. Т. 11. С. 52–56.
2. Иванов А. В. Региональный экологический мониторинг эпохи интернета вещей // Управление технологией: электрон. журн. 2018. Т. 1, вып. 2. С. 165–184.
3. Миклуш В. А., Татарникова Т. М., Палкин И. И. Решение задачи экологического мониторинга акватории порта с помощью распределенной системы датчиков // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 5. С. 404–411. doi: 10.17586/0021-3454-2021-64-5-404-411.
4. Чернецова Е. А., Шишкин А. Д. Обнаружение нефтяного загрязнения водной поверхности по сигналам контактных датчиков // Датчики и системы. 2008. № 9 (112). С. 2–4.
5. Гольдштейн Б. С., Кучерявый А. Е. Сети связи пост-NGN. СПб.: БХВ-Петербург, 2013. 160 с.
6. Krishnamurthy V. POMDP multi-armed bandit formulation for energy minimization in sensor networks // Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, Signal Processing (ICASSP). Philadelphia, PA, USA: IEEE, 2005. P. 793–796. doi: 10.1109/ICASSP.2005.1416423.

7. Татарникова Т. М., Богданов П. Ю., Краева Е. В. Предложения по обеспечению безопасности системы умного дома, основанные на оценке потребляемых ресурсов // Проблемы информационной безопасности. Компьютерные системы. 2020. № 4. С. 88–4.

8. Lee P. Internet of Things architects. Birmingham–Mumbai: Packt Publishing, 2018. 514 p.

9. Кнеллер В. Ю. «Приборное облако» – концепция функционирования сенсорных систем на основе интернет-технологии // Датчики и системы. 2010. № 8. С. 66–69.

10. Татарникова Т. М., Елизаров М. А. Процедура разрешения коллизий в RFID-системе // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 2. С. 150–157. doi: 10.17586/0021-3454-2017-60-2-150-157.

11. Ran G., Zhang H., Gong S. Improving on LEACH protocol of wireless sensor networks using fuzzy logic // J. Inf. Comput. Sci. 2010. N 7. P. 767–775.

12. Татарникова Т. М., Дзюбенко И. Н. Методы увеличения жизненного цикла сети интернета вещей // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18, № 5. С. 843–849. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-5-843-849.

Информация об авторах

Татарникова Татьяна Михайловна – д-р техн. наук, профессор СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: tm-tatarn@yandex.ru

<http://orcid.org/0000-0002-6419-0072>

Бимбетов Фараби – аспирант СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: fbimbetov@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0001-9740-7998>

Горина Елена Владимировна – канд. техн. наук, доцент Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна.

E-mail: elena_rez@mail.ru

<http://orcid.org/0000-0003-0908-7221>

References

1. Kucheryavj A. E., Borodin A. C., Kirichek R. V. Seti svyazi 2030 // *Elektrosvyaz'*. 2018. T. 11. S. 52–56. (In Russ.).

2. Ivanov A. V. Regional'nyj ekologicheskij monitoring epohi interneta veshchej // *Upravlenie tekhnosferoj: elektron. zhurn.* 2018 T. 1, vyp. 2. S. 165–184. (In Russ.).

3. Miklush V. A., Tatarnikova T. M., Palkin I. I. Reshenie zadachi ekologicheskogo monitoringa akvatorii porta s pomoshch'yu raspredelennoj sistemy datchikov // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Priborostroenie.* 2021. T. 64, no 5. S. 404–411. doi: 10.17586/0021-3454-2021-64-5-404-411. (In Russ.).

4. Chernecova E. A., Shishkin A. D. Obnaruzhenie neftyanogo zagryazneniya vodnoj poverhnosti po signalam kontaktnyh datchikov // *Datchiki i sistemy.* 2008. № 9 (112). S. 2–4. (In Russ.).

5. Gol'dshtejn B. S., Kucheryavj A. E. Seti svyazi post-NGN. SPb.: BHV-Peterburg, 2013. 160 s. (In Russ.).

6. Krishnamurthy V. POMDP multi-armed bandit formulation for energy minimization in sensor networks // *Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, Signal Processing (ICASSP).* Philadelphia, PA, USA: IEEE, 2005. R. 793–796. doi: 10.1109/ICASSP.2005.1416423.

7. Tatarnikova T. M., Bogdanov P. YU., Kraeva E. V. Predlozheniya po obespecheniyu bezopasnosti sistemy umnogo doma, osnovannye na ocenke potrebyaemykh re-sursov // *Problemy informacionnoj bezopasnosti. Komp'yuternye sistemy.* 2020. № 4. S. 88–4. (In Russ.).

8. Lee P. Internet of Things Architects. Birmingham–Mumbai: Packt Publishing, 2018. 514 p.

9. Kneller V. YU. «Pribornoe oblako» – koncepciya funkcionirovaniya sensoryh sistem na osnove inter-net-tekhnologii // *Datchiki i sistemy.* 2010. № 8. S. 66–69. (In Russ.).

10. Tatarnikova T. M., Elizarov M. A. Procedura razresheniya kollizij v RFID-sisteme // *Izv. vuzov. Priborostroenie.* 2017. T. 60, № 2. S. 150–157. doi: 10.17586/0021-3454-2017-60-2-150-157. (In Russ.).

11. Ran G., Zhang H., Gong S. Improving on LEACH protocol of wireless sensor networks using fuzzy logic // *J. Inf. Comput. Sci.* 2010. No. 7. P. 767–775.

12. Tatarnikova T. M., Dzyubenko I. N. Metody uvelicheniya zhiznennogo cikla seti interneta veshchej // *Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnyh technologij, mekhaniki i optiki.* 2018. T. 18, № 5. S. 843–849. doi: 10.17586/2226-1494-2018-18-5-843-849. (In Russ.).

Information about the authors

Tatiana M. Tatarnikova – Dr Sci. (Eng.), Professor of Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: tm-tatarn@yandex.ru
<http://orcid.org/0000-0002-6419-0072>

Farabi Bimbetov – postgraduate student of Saint Petersburg Electrotechnical University.
E-mail: fbimbetov@gmail.com
<http://orcid.org/0000-0001-9740-7998>

Elena V. Gorina – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design.
E-mail: elena_rez@mail.ru
<http://orcid.org/0000-0003-0908-7221>

Статья поступила в редакцию 08.02.2022; принята к публикации после рецензирования 24.02.2022; опубликована онлайн 30.03.2022.

Submitted 08.02.2022; accepted 24.02.2022; published online 30.03.2022.
