

ON RELIABILITY OF LINEAR WIRELESS SENSOR NETWORKS

V. V. Shakhov^{*,**}, H. Chen^{***}, A. N. Yurgenson^{**}, A. V. Loshkarev^{****}

*Novosibirsk State Technical University,
630073, Novosibirsk, Russia,

**Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,
630090, Novosibirsk, Russia,

***China University of Petroleum,
266580, Qindao, China,

****Siberian State University of Telecommunications and Informatics,
630102, Novosibirsk, Russia

DOI: 10.24412/2073-0667-2022-4-120-128

EDN: XDGSRY

Many solutions in the field of architecture of the Internet of things are based on the results of wireless sensor networks (WSN) research. Currently, corporations and government agencies, especially in the US, Europe and the Middle East, are making serious efforts to research, develop and patent wireless sensor network-based technologies for monitoring long pipelines for various purposes. WSNs are able to carry out continuous monitoring of critical infrastructure objects, detect any anomalies in real time and deliver the necessary data to the decision-making center. However, in this case, it becomes necessary to solve a number of problems, such as rational placement of nodes, optimization of energy consumption, efficient organization of data flows, etc., for the solution of which it is necessary to use methods for assessing the reliability and lifetime of the WSN. After all, these networks can be operated in harsh climatic conditions, network nodes can be located in places that are difficult to access for regular inspection.

The main role of sensor nodes in the WSN used for monitoring is to periodically collect and transmit data to an intelligent central base station (sink, sink), where the collected data is processed to detect various anomalous events. In large-scale WSNs used to monitor long objects, such as pipelines, most sensor nodes are geographically distant from the base station and are usually equipped with self-contained low-cost batteries, the capacity of which is relatively small. This circumstance largely determines the main disadvantages of extended WSNs, since the periodic transmission of raw data over long distances through several hops to the base station leads to a rapid discharge of the battery of sensor nodes and reduces the life of the network. Other disadvantages include low reliability of wireless channels, high cost of bandwidth, low level of data security. Thus, there is a need to solve optimization problems for extended WSNs, where the objective function or constraints contain a reliability indicator.

Authors propose an approach to solving a number of problems that arise when monitoring long pipelines using wireless sensor networks.

A typical scenario used in a number of recent publications on this topic is considered. The WSN consists of several sensor nodes located on the surface of the pipe, the topology is a simple chain, at the end of which there is a base station. The sensors are responsible for collecting data, periodically sending packets to the base station. All nodes play an important role in data forwarding, the node

Funding: The reported study was funded by RFBR and NSFC, project number 21-57-53011.

closest to the base station transmits data directly to the sink, intermediate nodes are used to transmit packets from other nodes, i.e. data sent by the sender to the sink is relayed by nodes located between the sender and the sink. The main power consumption is caused by traffic transmission. Obviously, this leads to excessive waste of energy of the sensor nodes located closer to the base station due to the high asymmetric load on these nodes.

Each sensor node performs periodic monitoring within its sensitivity range. All sensor nodes are initially in the same conditions, have similar communication capabilities, power consumption, their behavior is described by the same conceptual models. Each node transmits its packet to the neighboring node in the direction of the base station. The corresponding software module deployed on the base station receives data from all sensor nodes, decides on the presence or absence of a problem on its own, or via a highly reliable IP network, the data is transmitted to the decision center.

To formalize the reliability criteria, the corresponding mathematical models based on Markov processes have been developed. The obtained results make it possible to find a compromise between the reliability of the monitoring network and the costs of its deployment and maintenance.

Key words: wireless sensor networks, Internet of Things, structural health monitoring.

References

1. Uckelmann, D., Harrison, M., Michahelles, F. *Architecting the Internet of Things*. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2011.
2. Quintana-Suárez M., Sánchez-Rodríguez D., Alonso-González I., Alonso-Hernández J. A Low Cost Wireless Acoustic Sensor for Ambient Assisted Living Systems // *Applied Sciences*, Aug. 2017. V. 7. N 9. P. 877.
3. Nkemeni V., Mieveville F., and Tsafack P. A Distributed Computing Solution Based on Distributed Kalman Filter for Leak Detection in WSN-Based Water Pipeline Monitoring // *Sensors*, Sep. 2020. V. 20. N 18. P. 5204.
4. Ali S. et al. SimpliMote: A Wireless Sensor Network Monitoring Platform for Oil and Gas Pipelines // *IEEE Systems Journal*, March 2018. V. 12. N 1. P. 778–789.
5. Albaseer A., Baroudi U. Cluster-Based Node Placement Approach for Linear Pipeline Monitoring // *IEEE Access*, 2019. V. 7 P. 92388–92397.
6. Tong F., He S., Pan J. Modeling and Analysis for Data Collection in Duty-Cycled Linear Sensor Networks With Pipelined-Forwarding Feature // *IEEE Internet of Things Journal*, Dec. 2019. V. 6. N 6. P. 9489–9502.
7. Shakhov V.V., Yurgenson A.N. *Towards Edge Computing Based Monitoring for Smart Ports* // *Springer Lecture Notes in Computer Science*, 2021. V. 12956.
8. Wang Q. Packet traffic: a good data source for wireless sensor network modeling and anomaly detection // *IEEE Network*, May–June 2011. V. 25. N 3. P. 15–21.
9. Shakhov V., Koo I. Depletion-of-Battery Attack: Specificity, Modelling and Analysis // *Sensors*, June 2018. V. 18. N 6.
10. Shakhov V.V., Yurgenson A.N. *Towards Edge Computing Based Monitoring for Smart Ports* // *Springer Lecture Notes in Computer Science*, 2021. V. 12958.

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ЛИНЕЙНЫХ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ

В. В. Шахов^{*,**}, Х. Чен^{***}, А. Н. Юргенсон^{**}, А. В. Лошкарев^{****}

^{*}Новосибирский государственный технический университет,
630073, Новосибирск, Россия,

^{**}Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
630090, Новосибирск, Россия,

^{***}Китайский нефтяной университет,
266580, Qindao, Китай,

^{****}Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики,
630102, Новосибирск, Россия

УДК 004.7

DOI: 10.24412/2073-0667-2022-4-120-128

EDN: XDGSRY

Беспроводные сенсорные сети (БСС) способны осуществлять непрерывный контроль объектов критической инфраструктуры, в реальном времени обнаруживать любые аномалии и доставлять необходимые данные в центр принятия решений. Однако при этом возникает необходимость решения ряда задач, таких как рациональное размещение узлов, оптимизация энергопотребления, эффективная организация потоков данных и т. п. В работе предлагается подход к решению ряда задач, возникающих при мониторинге протяженных трубопроводов с использованием беспроводных сенсорных сетей. Для того чтобы в полной мере воспользоваться потенциалом технологий Интернета вещей, архитектурную основу которого формируют беспроводные сенсорные сети, необходимо разработать средства оценки надежности указанных сетей. Для формализации критериев надежности разработаны соответствующие математические модели на основе Марковских процессов. Полученные результаты позволяют найти компромисс между надежностью сети мониторинга и затратами на ее развертывание и обслуживание.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, Интернет вещей, надежность сетей, мониторинг конструкций.

Введение. Технологии Интернета вещей (Internet of Things, IoT) находятся в сфере особого внимания не только ведущих коммерческих компаний, исследовательских центров, но и правительств многих стран. В Российской Федерации технический комитет по стандартизации № 194 «Киберфизические системы» активно работает над рядом национальных стандартов в области IoT. Многие решения в области архитектуры IoT опираются на результаты исследований беспроводных сенсорных сетей. В качестве примера можно привести предложения, разработанные в ходе реализации проекта Internet of

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и ГФЕН в рамках научного проекта № 21-57-53011.

Статья по докладу на XVIII Международной Азиатской школе-семинаре «Проблемы оптимизации сложных систем», Киргизия, Иссык-Куль, 20.07.2022–30.07.2022.

Things-Architecture (IoT-A) 7-й рамочной программы Европейского Союза по развитию научных исследований и технологий [1]. Системы мониторинга жизненно важной инфраструктуры на основе беспроводных сенсорных сетей (БСС) являются одной из наиболее востребованных технологий IoT, поскольку надлежащий мониторинг позволит снизить ущерб от природных и техногенных катастроф, своевременно реагировать на последствия износа инфраструктуры, снизить экологические и экономические риски.

В настоящее время корпорации и правительственные учреждения, особенно в США, Европе и на Ближнем Востоке, прилагают серьезные усилия, направленные на исследования, разработку и патентование основанных на беспроводных сенсорных сетях технологий мониторинга протяженных трубопроводов различного назначения. В частности, исследования по использованию БСС для мониторинга трубопроводов проводились в рамках совместных исследовательских проектов Стэнфордского университета, Южно-Калифорнийского университета и корпорации Chevron. Конкурс поиска решений для мониторинга трубопроводов проводился агентством федерального правительства США (Бюро мелиорации) на краудсорсинговой платформе Innocentive. Согласно аналитическому отчету GlobeNewswire, даже для такой частной проблемы как мониторинг водопроводов с целью обнаружения утечек рынок решений достигает миллиарда долларов и растет на 5 % в год. БСС способны осуществлять непрерывный контроль объектов критической инфраструктуры, в реальном времени обнаруживать любые аномалии и доставлять необходимые данные в центр принятия решений. Однако при этом возникает необходимость решения ряда задач, таких как рациональное размещение узлов, оптимизация энергопотребления, эффективная организация потоков данных и т. п., для решения которых необходимо использовать методы оценки надежности и времени жизни БСС.

Необходимо заметить, что экспертами в области информатизации выдвигаются обоснованные сомнения в надежности технологий IoT в целом и в конечной выгоде для общества от внедрения разработок, надежность которых не гарантирована. В особенности это касается модернизации критической инфраструктуры. Отмечается, что компании, специализирующиеся на технологиях IoT, стремятся скорее занять как можно большую часть рынка и ставят приоритетной целью скорейший выпуск продукции, не уделяя достаточно внимания вопросам ее надежности и безопасности. Для того чтобы в полной мере задействовать потенциал технологий IoT, необходимо разработать соответствующие инструменты оценки и обеспечения их надежности. В особенности, это касается систем мониторинга трубопроводов с использованием БСС, поскольку указанные сети могут эксплуатироваться в суровых климатических условиях, сетевые узлы могут находиться в труднодоступных для штатной инспекции местах. Основная роль сенсорных узлов в БСС, используемых для мониторинга, заключается в периодическом сборе и передаче данных на интеллектуальную центральную базовую станцию (sink, сток), где осуществляется обработка собранных данных для обнаружения разнообразных аномальных событий. В крупномасштабных БСС, задействованных для мониторинга протяженных объектов, таких как трубопроводы, большинство сенсорных узлов географически удалены от базовой станции и обычно оснащаются автономными недорогими батареями, емкость которых относительно небольшая. Указанное обстоятельство во многом определяет основные недостатки протяженных БСС, поскольку периодическая передача необработанных данных на большие расстояния через несколько переходов к базовой станции приводит к быстрому разряду батареи сенсорных узлов и сокращает срок службы сети. Другие недостатки включают низкую надежность беспроводных каналов, высокую стоимость полосы пропускания, низкий уро-

вень безопасности данных [2–3]. Таким образом, возникает необходимость решения задач оптимизации протяженных БСС, где в целевой функции или ограничениях присутствует показатель надежности.

1. Модель системы. Рассматривается типовой сценарий, используемый в ряде недавних публикаций по данной тематике [4–7]. БСС состоит из нескольких (n) сенсорных узлов, размещенных на поверхности трубы, топология представляет простую цепь, в конце которой находится базовая станция. Сенсоры отвечают за сбор данных, периодически отсылают пакеты на базовую станцию. Все узлы играют важную роль в пересылке данных, ближайший к базовой станции узел передает данные в сток напрямую, для передачи пакетов от остальных узлов используются промежуточные узлы, т. е. направляемые отправителем в сток данные ретранслируются узлами, расположенными между отправителем и стоком. Основное энергопотребление вызвано передачей трафика. Очевидно, это приводит к чрезмерной трате энергии сенсорных узлов, расположенных ближе к базовой станции из-за высокой асимметричной нагрузки на эти узлы. Каждый сенсорный узел осуществляет периодический мониторинг в пределах своего диапазона чувствительности. Все сенсорные узлы изначально находятся в одинаковых условиях, обладают схожими коммуникационными возможностями, энергопотреблением, их поведение описывается одинаковыми концептуальными моделями. Каждый узел передает свой пакет соседнему узлу в направлении базовой станции. Расстояние между соседними узлами отличается незначительно. Соответствующий программный модуль, развернутый на базовой станции, получает данные со всех сенсорных узлов, принимает решение о наличии или отсутствии проблемы самостоятельно, либо посредством высоконадежной IP-сети данные передаются в центр принятия решений.

Нагрузку, создаваемую сенсорным узлом, будем моделировать Пуассоновским процессом, что также не только является общеупотребимым предположением, но и многократно проверялось экспериментально [8]. Интенсивность потока данных от сенсора j обозначим через $\lambda_j = \lambda, \forall j = 1 \dots n$. Для однородных узлов текущую емкость батареи узла (C) можно измерять в количестве потенциально возможных передач пакетов [9]. Таким образом, поведение батареи узла моделируется Марковской цепью с непрерывным временем: $C(t), t > 0$. Время жизни узла является случайной величиной, формируется временем, которое тратит система на переход из текущего состояния в финальное состояние, когда недостаточно энергии для передачи пакета. Не уменьшая общности, можно для финального состояния принять: $C(t) = 0$.

Начальная емкость батареи достаточна для передачи C_0 пакетов. Введем вероятности состояний,

$$P_k(t) = P[C(t) = k], \quad k = 0, 1, \dots, C_0.$$

Тогда уравнения Колмогорова для данной системы:

$$\frac{dP_k(t)}{dt} = -\lambda P_k(t) + \lambda P_{k+1}(t), \quad 0 < k < C_0,$$

$$\frac{dP_{C_0}(t)}{dt} = -\lambda P_{C_0}(t),$$

кроме того

$$P_k(0) = \begin{cases} 1, & k = 0 \\ 0, & k < 0 \end{cases}.$$

Также должно выполняться условие нормализации:

$$\sum_k P_k(t) = 1.$$

Данный процесс является вариацией процесса гибели и размножения, содержит абсорбирующее состояние, переходы из состояния в состояние возможны лишь в направлении уменьшения популяции. Решение системы уравнений Колмогорова в данном случае принимает вид:

$$P_k(t) = \frac{(\lambda t)^{o-k}}{(o-k)!} e^{-\lambda t}, \quad 0 < k \leq o.$$

Следовательно,

$$P_0(t) = 1 - e^{-\lambda t} \sum_{k=0}^{o-1} \frac{(\lambda t)^k}{k!}.$$

Полученная функция описывает вероятность того, что батарея сенсора будет разряжена к моменту времени t , т. е. $P_0(t)$ позволяет получить представление о времени жизни сенсора и формализовать различные критерии надежности сети. Так, среднее время жизни (mean life time, MLT) узла:

$$MLT = \frac{o}{\lambda}.$$

Для получения данной формулы достаточно воспользоваться свойствами распределения Эрланга.

2. Анализ. Используя результаты предыдущего раздела для сенсора с энергозапасом C , получаем среднее время жизни сенсора: $\bar{\lambda}$. Принимая во внимание свойства Пуассоновского процесса, получаем, что для однородной БСС среднее время жизни сенсоров (от дальнего к стоку сенсора к ближнему) будет следующим:

$$\bar{\lambda}, \quad \bar{2\lambda}, \dots, \quad \bar{n\lambda},$$

поскольку промежуточному сенсору необходимо передавать пакеты всех сенсоров, удаленных от стока на большее расстояние. Сеть станет несвязной в течение времени, в n раз меньшем, чем время жизни дальнего узла. Для сбалансированного времени жизни узлов необходимо отказаться от использования однородных по энергозапасу узлов, т. е. для узла, отстоящего от стока на j хопов, емкость батареи должна быть: $(n - j + 1)$.

Также, основываясь на критерии среднего времени жизни узла, можно сделать вывод о несостоятельности подхода к оптимизации и балансировке энергопотребления линейных БСС, предложенному в статье [5], согласно которому узлы разбиваются на кластеры по 3 узла, один из узлов агрегирует трафик и пересылает симметричному узлу в следующем кластере. Если в качестве головного узла кластера берется средний узел, действительно, среднее время жизни двух других узлов кластера будет $\bar{\lambda}$. Однако, головной узел должен передавать данные на расстояние, увеличенное втрое. Принимая во внимание то, что рост энергорасходов на трансляцию данных растет пропорционально квадрату расстояния, емкость данного узла уже будет не C , а $\frac{C}{9}$, соответственно среднее время жизни головного узла без учета ретрансляции трафика снизится до $\frac{\bar{\lambda}}{27}$.

Даже если брать в качестве критерия общие энергозатраты, а не надежность в каком-либо виде, то кластеризация, описанная в [5], все равно имеет ограниченное применение. Пусть e_1 — энергозатраты на передачу пакета в соседний узел (1-хоп), а e_2 — энергозатраты на передачу пакета между головными узлами кластеров, a — следующий коэффициент:

$$e_2 = ae_1, \quad a > 1.$$

Тогда получаем условие выгоды рассматриваемого способа кластеризации:

$$a < \frac{7}{3} - \frac{6}{n+3}.$$

Как отмечалось выше, во многих практических случаях принимается $a \approx 9$, т. е. при использовании рассматриваемой кластеризации с целью энергосбережения необходимо снижать мощность передатчика, что неизбежно ведет к деградации отношения «сигнал-шум» и качества обслуживания.

Формулу $P_0(t)$ можно применять для формализации других критериев надежности, например, вероятности безотказной работы в течение предписанного времени. Также, используя полученные выше результаты и подмодели для λ и C , можно оценивать различные подходы к агрегированию трафика, оптимизировать функциональную надежность сети. В качестве примера рассмотрим задачу выбора оптимального размера сообщения при использовании корректирующего кода следующего вида:

$$\max_n MLT,$$

$$R(p, n, k(n)) \geq \alpha.$$

Здесь p — вероятность ошибки при передаче одного символа; n — длина сообщения; $k(n)$ — максимальное число искаженных символов, при котором возможно корректное восстановление сообщения; функция R — вероятность восстановления сообщения; α — требуемая надежность передачи. С ростом n растет дистанция между передаваемыми словами, и надежность корректной передачи возрастает. С другой стороны, чем больше n , тем выше энергозатраты на передачу. Функция R принимает следующий вид [10] для передачи в смежный узел:

$$R(p, n, k) = \sum_{j=0}^k C_n^j p^j (1-p)^{n-j}.$$

При передаче в сток через h каналов ($h-1$ промежуточный узел) с коррекцией в промежуточных узлах получаем:

$$R(p, n, k) = \sum_{j=0}^k C_N^j (1 - (1-p)^h)^j (1-p)^{h(N-j)}.$$

Функция $R(p, n, k)$ монотонно возрастает по n . Отсюда

$$n_{opt} = \arg \min \{R(p, n, k(n)) = \alpha\},$$

принимая во внимание формулу для MLT.

Заключение. В статье предложен подход к формализации критерия надежности протяженных БСС. Показано, что в однородных БСС конструктивно заложен серьезный дисбаланс в энергопотреблении узлов. Приведено обоснование тому, что предложенный недавно подход к энергосбережению линейных БСС с использованием кластеризации [5], вообще говоря, не является состоятельным и влечет деградацию надежности сети.

Для обеспечения требуемого уровня надежности линейных беспроводных сенсорных сетей представляется перспективным использовать мобильные базовые станции на БПЛА, несмотря на то, что общие системные энергозатраты возрастут. Также отметим перспективность исследования и разработки эффективных механизмов агрегирования трафика с использованием помехоустойчивого кодирования.

Список литературы

1. Uckelmann, D., Harrison, M., Michahelles, F. Architecting the Internet of Things. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2011.
2. Quintana-Suárez M., Sánchez-Rodríguez D., Alonso-González I., Alonso-Hernández J. A Low Cost Wireless Acoustic Sensor for Ambient Assisted Living Systems // Applied Sciences, Aug. 2017. V. 7. N 9. P. 877.
3. Nkemeni V., Miekeville F., and Tsafack P. A Distributed Computing Solution Based on Distributed Kalman Filter for Leak Detection in WSN-Based Water Pipeline Monitoring // Sensors, Sep. 2020. V. 20. N 18. P. 5204.
4. Ali S. et al. SimpliMote: A Wireless Sensor Network Monitoring Platform for Oil and Gas Pipelines // IEEE Systems Journal, March 2018. V. 12. N 1. P. 778–789.
5. Albaseer A., Baroudi U. Cluster-Based Node Placement Approach for Linear Pipeline Monitoring // IEEE Access, 2019. V. 7 P. 92388–92397.
6. Tong F., He S., Pan J. Modeling and Analysis for Data Collection in Duty-Cycled Linear Sensor Networks With Pipelined-Forwarding Feature // IEEE Internet of Things Journal, Dec. 2019. V. 6. N 6. P. 9489–9502.
7. Shakhov V. V., Yurgenson A. N. Towards Edge Computing Based Monitoring for Smart Ports // Springer Lecture Notes in Computer Science, 2021. V. 12956.
8. Wang Q. Packet traffic: a good data source for wireless sensor network modeling and anomaly detection // IEEE Network, May–June 2011. V. 25. N 3. P. 15–21.
9. Shakhov V., Koo I. Depletion-of-Battery Attack: Specificity, Modelling and Analysis // Sensors, June 2018. V. 18. N 6.
10. Shakhov V. V., Yurgenson A. N. Towards Edge Computing Based Monitoring for Smart Ports // Springer Lecture Notes in Computer Science, 2021. V. 12958.



Шахов Владимир Владимирович — старший научный сотрудник лаборатории системного моделирования и оптимизации Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, доцент Новосибирского государственного технического университета. Окончил

Механико-математический факультет Новосибирского государственного университета, получил степень кандидата физико-математических наук. Научные интересы включают моделирование и оценку производительности технических систем, технологии Интернета вещей, интеллектуальный анализ данных. E-mail: shakhov@rav.sccc.ru.

Dr. Vladimir V. Shakhov is a Senior Researcher with the Laboratory of system

modeling and optimization of Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS and Associate Professor of Novosibirsk State Technical University. He received the B.S. in mechanics and applied mathematics, M.S. degrees in mathematics, and Ph.D. degree in computer science from the Novosibirsk State University. He was the Vice Chair of the IEEE Russian Siberia Section. His research interests include Applied Mathematics with Computer Science Applications, IoT Technologies, and Data Analytics. E-mail: shakhov@rav.sccc.ru.

Чен Хонглунг — (Senior Member, IEEE) получил степень магистра в области управления и техники в университете Zhejiang, Ханчжоу, Китай, в 2008 году, а также получил

степень Ph.D. в области компьютерных наук в Гонконгском политехническом университете, Гонконг, в 2012 году. С 2015 по 2016 год был научным сотрудником в Школе CIDSE, Университет штата Аризона, Темпе, Аризона, США. В настоящее время является профессором и научным руководителем Ph.D. Колледжа науки и техники управления Китайского нефтяного университета, Пекин, Китай. Текущие исследовательские интересы связаны с Интернетом вещей и кибербезопасностью. Проф. Чен был приглашенным редактором журнала IEEE Transactions по промышленной информатике. Является старшим членом Китайской компьютерной федерации и членом ACM. E-mail: honglongchen1984@gmail.com.



Prof. **Honglong Chen** (Senior Member, IEEE) received the M.E. degree in control science and engineering from Zhejiang University, Hangzhou, China, in 2008, and the Ph.D. degree in computer science from The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, in 2012., He was a Postdoctoral Researcher with the School of CIDSE, Arizona State University, Tempe, AZ, USA, from 2015 to 2016. He is currently a Professor and a Ph.D. Supervisor with the College of Control Science and Engineering, China University of Petroleum, Beijing, China. His current research interests are in the areas of Internet of Things and cyber security., Prof. Chen served as a Guest Editor of IEEE Transactions on Industrial Informatics. He is a Senior Member of the China Computer Federation and a member of ACM. E-mail: honglongchen1984@gmail.com.

Юргенсон Анастасия Николаевна — научный сотрудник лаборатории системного моделирования и оптимизации Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН. В 2003 году окончи-

ла механико-математический факультет Новосибирского государственного университета. В 2006 получила степень кандидата физико-математических наук. Научные интересы включают теорию графов и гиперсетей, надежность сетей связи. E-mail: nastya@rav.sccc.ru.



Anastasia N. Yurgenson is researcher, Laboratory of System Modeling and Optimization, Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. She graduated the Novosibirsk State University in 2003. She received the Ph.D. degree in computer science in 2006. Her research interests include the theory of graphs and hypernetworks, the reliability of communication networks. E-mail: nastya@rav.sccc.ru.



Лошкарев Александр Васильевич — окончил магистратуру Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики в 2012 г. В настоящее время является заведующим лаборатории кафедры телекоммуникационных сетей и вычислительных средств, СибГУТИ. Научные интересы включают теорию множественного доступа, мультифункциональные беспроводные сети 4G и 5G. E-mail: a.loshkarev@ts.sibsutis.ru.

Alexander V. Loshkarev graduated from the Siberian State University of Telecommunications and Informatics in 2012. Currently, he is the head of the laboratory of the Department of Telecommunication Networks and Computing Tools, SibSUTIS. His research interests include multiple access theory, 4G and 5G multifunctional wireless networks. E-mail: a.loshkarev@ts.sibsutis.ru.

Дата поступления — 19.10.2022