
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ

УДК 681.3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АЛГОРИТМА КОНКУРЕНТНОГО ДОСТУПА К СРЕДЕ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ ВРЕМЕНИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ В ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ¹

Статья поступила в редакцию 26.11. 2014, в окончательном варианте 02.02. 2015

Азизов Радомир Фаилович, аспирант, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 101000, Российская Федерация, г. Москва, ул. Мясницкая, 20, e-mail: radomir.azizov@gmail.com

Аминев Дмитрий Андреевич, кандидат технических наук, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 101000, Российская Федерация, г. Москва, ул. Мясницкая, 20, e-mail: aminev.d.a@yandex.ru

Увайсов Сайгид Увайсович, доктор технических наук, профессор, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 101000, Российская Федерация, г. Москва, ул. Мясницкая, 20, e-mail: uvaysov@yandex.ru

Юрков Николай Кондратьевич, доктор технических наук, Пензенский государственный университет, 440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, 40, e-mail: yurkov_nk@mail.ru

Рассмотрены принципы организации связи в децентрализованных беспроводных сетях. Представлена схема децентрализованной сети и временная диаграмма передачи данных между ее узлами. Исследована проблема обеспечения эффективности совместной работы нескольких узлов в маломощных сетях и возможность применения для этой цели вероятностного сетевого протокола канального уровня. Проведен анализ алгоритма доступа к среде в децентрализованной сети, представлена его блок-схема. Подробно описаны блоки алгоритма, определяющие время передачи данных от узла сети. С помощью вычислительных экспериментов над моделью децентрализованной сети проведено исследование зависимости эффективности работы алгоритма обеспечения доступа к радиоэффиру от таких временных характеристик, как задержки перед отправкой данных и периода ожидания перед следующей попыткой их отправки. Выявлен наиболее нагруженный момент по времени при сетевом обмене. Показано, что разработанная компьютерная программа позволяет также вычислять вероятные коллизии в эфире. Предложен вариант аппаратной реализации алгоритма на основе микроконтроллера STM32F030F4P6 компании ST Microelectronics и приёмопередатчика CC1101 компании Texas Instruments.

Ключевые слова: децентрализованная сеть, доступ к среде, передача данных, сетевой протокол, беспроводная сеть, алгоритм доступа к эфиру, коллизии, микроконтроллер, приёмопередатчик, временной интервал, задержка, пропускная способность

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-07-00422). «Информационно-измерительная система численного моделирования и мониторинга температурных полей электронных средств».

**DETERMINATION OF THE OPTIMAL CHARACTERISTICS
OF THE CSMA/CA ALGORITHM FOR MINIMIZE TRANSMISSION TIME
IN DECENTRALIZED WIRELESS NETWORKS**

Azizov Radomir F., post-graduate student, National Research University Higher School of Economics, 20 Myasnitskaya St., Moscow, 101000, Russian Federation, e-mail: radomir.azizov@gmail.com

Aminev Dmitry A., Ph.D. (Engineering), National Research University Higher School of Economics, 20 Myasnitskaya St., Moscow, 101000, Russian Federation, e-mail: aminev.d.a@yandex.ru

Uvaysov Saygid U., D.Sc. (Engineering), Professor, National Research University Higher School of Economics, 20 Myasnitskaya St., Moscow, 101000, Russian Federation, e-mail: uvaysov@yandex.ru

Yurkov Nikolay K., D.Sc. (Engineering), Penza State University, 40 Krasnaya St., Penza, 440026, Russian Federation, e-mail: yurkov_nk@mail.ru

Provides an overview of the principles of organization of communication in decentralized wireless networks is reviewed. The scheme of the decentralized network and the timing diagram of data transfer between nodes are shown. Investigated the problem of ensuring the effectiveness of collaboration with a number of nodes in low-power networks and consider the possibility of using for this purpose a probabilistic network Protocol data-link layer. The analysis of the algorithm access to the environment in a decentralized network, presents its block diagram. Detail displayed blocks of the algorithm that determine when data transmission from the network node. Through computational experiments on a model of a decentralized network investigated of the dependence of the efficiency of the work of the algorithm access to the airwaves from such temporal characteristics as the delay before sending data and waiting period before attempting to send them. The most loaded time point identified in the network exchange. It is shown that the developed computer program allow to calculate the probable collisions in the air. Suggested hardware implementation of the algorithm based on microcontroller STM32F030F4P6 of ST Microelectronics and transceiver CC1101 of Texas Instruments.

Keywords: decentralized network, media access, data transmission, network protocol, wireless network, algorithm access to air, collisions, microcontroller, transceiver, time interval, delay, bandwidth

Введение. В децентрализованных самоорганизующихся сетях особое внимание уделяется возможностям совместной работы нескольких узлов для обеспечения ретрансляции и увеличения жизнеспособности сети в целом. Так как состав сети заранее не определен, то для решения указанных задач необходимо использовать алгоритм разделения доступа к среде. Для различных сценариев применения сети, оптимальный алгоритм может быть различным. Поэтому целью данной работы является определение оптимального алгоритма доступа к среде в децентрализованной сети при необходимости одновременной передачи данных всеми модулями (узлами) за минимальный промежуток времени.

Общая характеристика проблематики работы. В децентрализованной самоорганизующейся беспроводной сети все узлы являются равнозначными с позиций приема-передачи информации. Каждый узел может играть роль ретранслятора, создавать и разрывать связи в режиме реального времени. Отсутствие ведущих устройств позволяет беспроводной сети функционировать независимо от состава и количества участников взаимодействия [6]. Так как в децентрализованной сети нет управляющего устройства, то необходимо применение эффективного алгоритма разделения беспроводного канала между всеми участниками [5, 7, 9].

Для выполнения данной задачи может использоваться вероятностный сетевой протокол канального уровня CSMA/CA [10]. Согласно этому протоколу узел сети, желающий передать пакет данных, выполняет процедуру оценки чистоты канала, то есть слушает шумы в

передающей среде в течение заранее определенного промежутка времени. Если передающая среда оценивается как «чистая», то узел может передать пакет данных. В противном случае, если другим узлом уже выполняется передача, то рассматриваемый узел ждёт определённое количество времени, прежде чем опять предпринять попытку отправки пакета.

Так как реализация доступа к среде требует быстрой реакции на изменения в эфире, то необходимо использовать приёмопередатчик с хорошими временными характеристиками и программное обеспечение для работы в реальном времени [3, 4]. Для обеспечения этих требований авторами был разработан модуль управления приёмопередатчиком с помощью микроконтроллера.

Описание алгоритма конкурентного доступа к среде. Рассмотрим случай, при котором узлы А, В, С одновременно производят попытку передачи данных узлу D (рис. 1а). Пример реализации конкурентного доступа к среде узлов А, В и С по схеме на рисунке 1а представлен на рисунке 1б. Эффективность работы такой сети в большой степени зависит от эффективности используемого алгоритма доступа к среде. Для рассматриваемого случая авторами предлагается использовать производный от CSMA/CA алгоритм (рис. 1в), позволяющий эффективно обеспечивать доступ к эфиру нескольким узлам с низкой вероятностью коллизий.

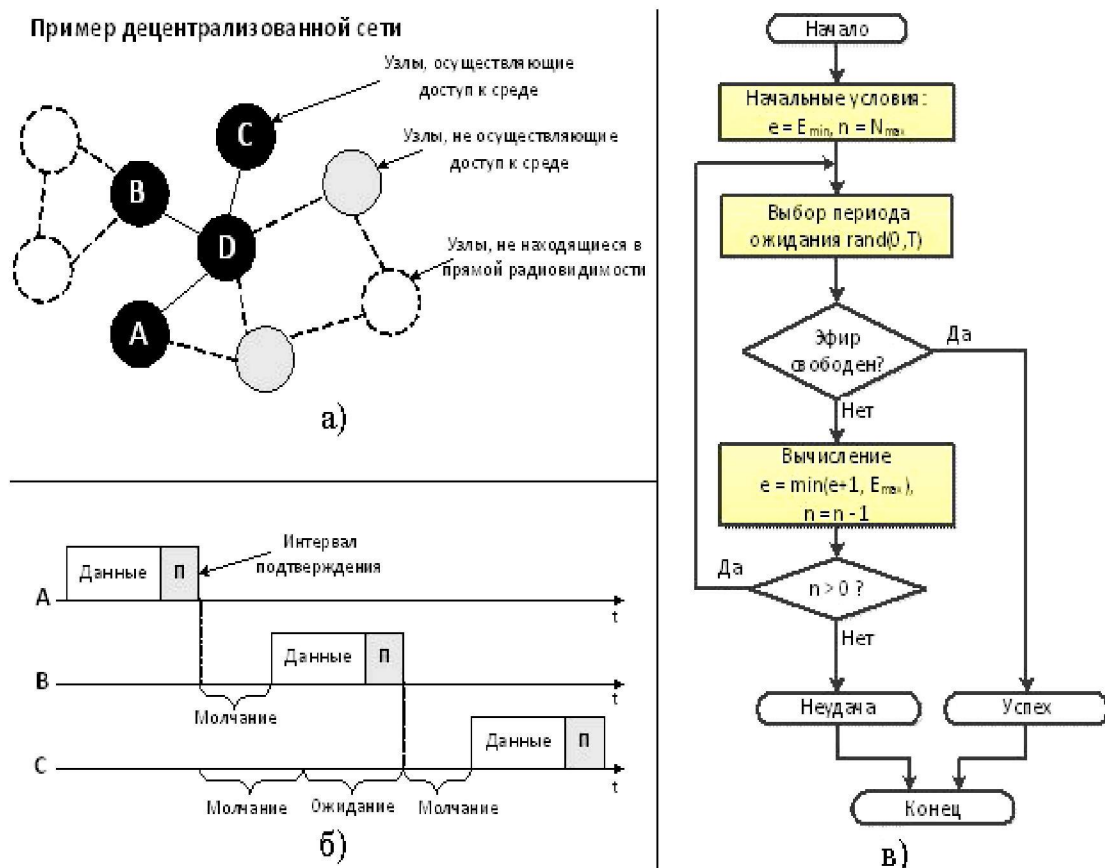


Рис. 1. Схема организации передачи данных между узлами децентрализованной сети и алгоритм конкурентного доступа к среде

При необходимости передачи переменная e , используемая для расчета задержки перед отправкой данных, инициализируется начальным значением $E_{\min}$, также устанавливается максимальное количество попыток отправки $N_{\max}$. На практике, $E_{\min}$ как правило, выбирается равным 1, а $N_{\max}$ – от 2-х до 10-ти.

Период ожидания перед попыткой передачи пакета определяется значением функции *rand*, используемой для выбора случайного промежутка времени в диапазоне от 0 до $T = (2^e - 1)$, где e меняется с каждой итерацией проверки доступности эфира от $E_{\min}$ до $E_{\max}$. При достижении значения $E_{\max}$ величина e больше не увеличивается. После каждой попытки перехода в режим передачи, счётчик оставшихся попыток уменьшается на «1». Если счётчик количества оставшихся попыток n достиг нуля, то попытки прослушивания эфира прекращаются (неудача). При обнаружении свободного эфира на очередной попытке, алгоритм передает управление процессу передачи данных (успех).

Наиболее нагруженным для эфира при сетевом обмене является момент ответа множества узлов на запрос. Для этого случая необходимо учитывать временные параметры различных сценариев работы сети. Например, при различных комбинациях числа передающих узлов и размеров пакетов оптимальные временные параметры различны.

В децентрализованной сети с конкурентным доступом предлагается вычислять время ожидания доступности сети для передачи по формуле [1]:

$$T = (2^e - 1) \cdot t_c + t_{ask}, \quad (1)$$

где t_c – квант ожидания, t_{ask} – фиксированный временной интервал для пакета подтверждения доставки данных. Константа t_{ask} зависит от характеристик приёмопередатчика и должна быть больше времени, необходимого для передачи пакета подтверждения. Выделение временного интервала t_{ask} увеличивает вероятность прохождения пакета подтверждения успешной доставки данных (квитирования).

Конкретной задачей данного исследования является поиск оптимальных значений $E_{\min}$ и $E_{\max}$ при заданном количестве узлов сети и типовом размере информационного пакета для используемого приёмопередатчика.

Определение оптимальных характеристик алгоритма. Для оценки эффективности алгоритма была разработана программа, реализующая алгоритм доступа к среде (рис. 1в) и вычисляющая вероятные коллизии в эфире. Целью (результатом) ее использования является получение оптимальных вариантов значения e в формуле (1).

В программе задается количество узлов и типовой размер посылок (пакетов). Входные данные: оптимальные параметры алгоритма доступа к среде для обеспечения максимальной пропускной способности.

С использованием имитационного стохастического моделирования оценим оптимальные значения параметров $E_{\min}$ и $E_{\max}$ для различных конфигураций сети: при передаче пакетов размером 16, 128, 256 байт одновременно для 2, 10, а также 50 и 100 узлов. Каждый результат на рисунке 2 представляет собой усреднённое значение по 100 тактам моделирования.

По результатам моделирования видно, что оптимальным $E_{\min}$ для всех вариантов является минимальное значение равное «1». $E_{\max}$ меняется для различных условий, но при увеличении нагрузки на сеть стремится к «1». Кроме того, при более нагруженной сети (с более длинными посылками), $E_{\max}$ достигает значения «1» раньше. Таким образом, в более нагруженной сети эффективность использования формулы (1) для алгоритма доступа к

эффиру «пропадает» раньше, чем в малонагруженных сетях. Это связано с тем, что при высокой нагрузке значительно возрастает количество коллизий и периоды ожидания становятся неоптимальными.

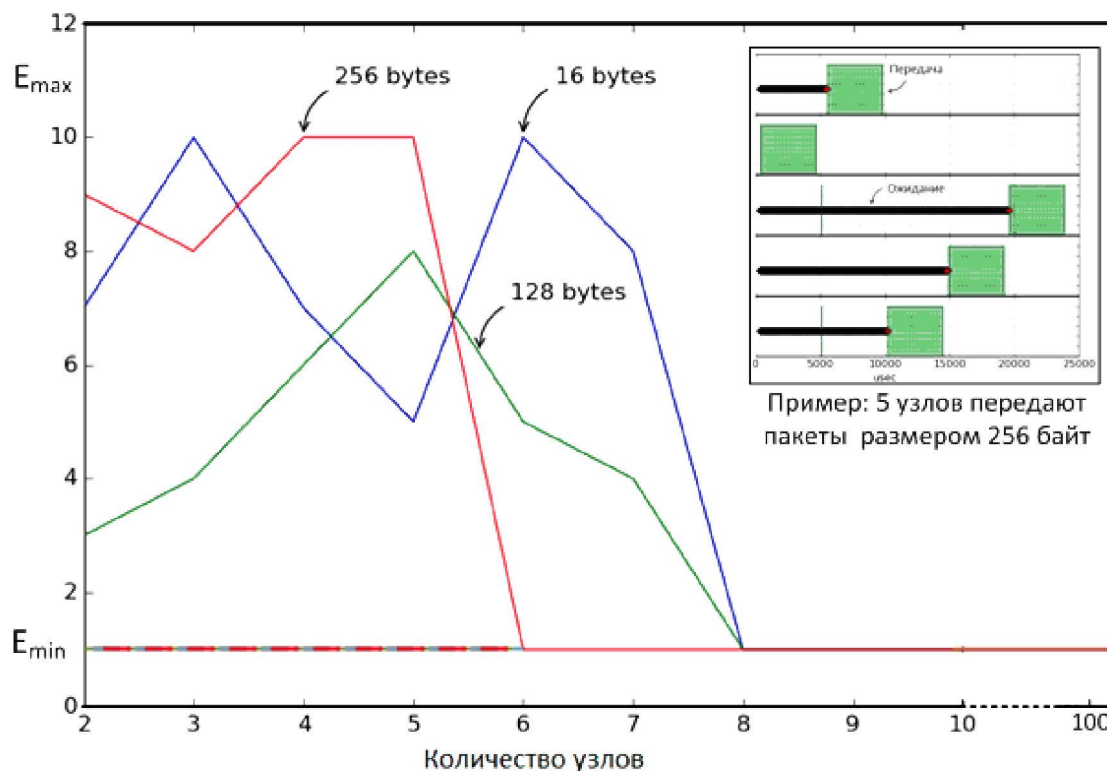


Рис. 2. Зависимость $E_{\min}$ и $E_{\max}$ от общего количества узлов сети при разных размерах пакетов данных

Аппаратная реализация алгоритма. С целью эффективной реализации алгоритма для децентрализованной сети в качестве приёмопередатчика была выбрана микросхема CC1101 компании Texas Instruments, так как она обладает возможностью гибкой настройки параметров, малыми габаритами и удобной системой управления. В качестве управляющего контроллера был выбран микроконтроллер STM32F030F4P6 компании ST Microelectronics (ядро ARM Cortex-M0, 4 Кб ОЗУ, 16 Кб ПЗУ), обладающий богатым набором возможностей при небольших габаритных размерах. Структурная схема устройства и его внешний вид представлены на рисунке 3.

Микроконтроллер STM32 выполняет функции построения сети, обеспечивает обмен данными с внешними устройствами посредством проводных интерфейсов, а также управляет приёмо-передающим модулем на базе микросхемы CC1101. Устройство способно передавать радиосигнал на частоте 868 МГц мощностью до 10 мВт, имеет контакт для подключения антенны [8]. Модуль обеспечивает передачу информационных посылок на скорости до 500 Кбит/с. При этом он обладает небольшими размерами (23 x 12,7 x 3,5 мм) и малым энергопотреблением (до 40мА в режиме приёма). При необходимости передатчик можно использовать как составную часть устройств под управлением операционной системой GNU Linux [2].

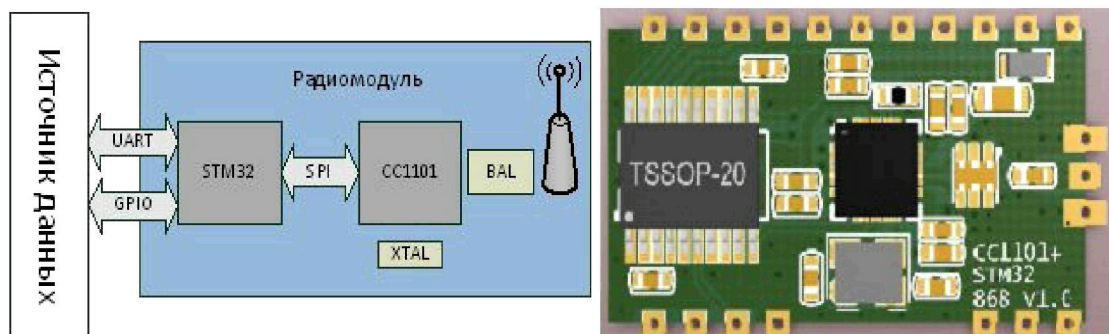


Рис. 3. Структурная схема и внешний вид приемопередающего модуля

Выводы. Таким образом, предлагаемое решение по определению оптимальных характеристик алгоритма конкурентного доступа к беспроводной среде пригодно для организации передачи трафика сети без ведущего устройства и может быть легко реализовано на современной элементной базе. Алгоритм обеспечивает разнесение передаваемого радиосигнала во времени для предотвращения взаимного создания узлами радиопомех.

Из результатов вычислительных экспериментов видно, что для сети, в которой целью является передача данных за минимально возможный промежуток времени, с увеличением нагрузки на сеть возникает необходимость уменьшения периодов ожидания T .

Предложенный алгоритм в случае применения в сетях с высокоинтенсивными интервальными нагрузками, такими как сети сбора данных, или для обеспечения взаимодействия групп мобильных роботов, может обеспечить эффективное использование ресурсов сети.

Список литературы

1. Азизов Р. Ф. Организация связи на основе приоритетов для улучшения ЭМС при информационном обмене в децентрализованной сети / Р. Ф. Азизов, Д. А. Аминев, И. А. Иванов, С. У. Увайсов // Технологии электромагнитной совместимости. – 2013. – № 4 (47). – С. 5–8.
2. Азизов Р. Ф. Программная интеграция элементов узла децентрализованной сети / Р. Ф. Азизов, Д. А. Аминев, С. У. Увайсов // Innovative Information Technologies : materials of the International scientific – practical conference. – Прага, 2013. – Part 3. – С. 23–26.
3. Сивагина Ю. А. Обзор современных симплексных ретрансляторов радиосигналов / Ю. А. Сивагина, И. Д. Граб, Н. В. Горячев, Н. К. Юрков // Надежность и качество : труды Международного симпозиума. – 2012. – Т. 1. – С. 74–76.
4. Стрельцов Н. А. SDR-трансиверы и их применение / Н. А. Стрельцов, Н. В. Горячев, В. А. Трусов // Надежность и качество : труды Международного симпозиума. – 2014. – Т. 1. – С. 281–282.
5. Таненбаум Э. Компьютерные сети / Э. Таненбаум, Д. Уэзеролл. – 5-е изд. – Санкт-петербург : Питер, 2012. – 960 с.
6. Финогеев А. Г. Анализ данных в системе диспетчеризации городского теплоснабжения / А. Г. Финогеев, И. С. Нефедова, Е. А. Финогеев, В. Т. Куанг, В. А. Камаев, С. В. Шевченко, А. А. Финогеев // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2014. – № 2 (26). – С. 182–196.
7. Юрков Н. К. Оценка безопасности сложных технических систем / Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2013. – № 1. – С. 11–16.
8. Aminev D. Recommendations for the choice of antenna transceivers of decentralized self-organizing networks / D. Aminev, R. Azizov, S. Uvaysov // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий: материалы международной научно-технической конференции / отв. ред. И. А. Иванов; под общ. ред. С. У. Увайсова. – Москва : Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета "Высшая школа экономики", 2013. – С. 480–481.
9. Bushmelev P. E. Modeling the optimal parameters for a remote sensing device / P. E. Bushmelev, K. I. Bushmeleva, I. I. Plyusnin, S. U. Uvaysov // Measurement Techniques. – 2011. – Vol. 54, no. 3, pp. 294–299.
10. Information Technology – Telecommunications and Information Exchange Between Systems – Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements – Part 15.4: Wireless Medium Access Con-

trol (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). – Amendment : Alternative Physical Layer Extension to Support the Japanese 950MHz Band. – Note: supplement to ANSI/IEEE 802.15.4-2006* Approved 2009-07-28.

References

1. Azizov R. F., Aminev D. A., Ivanov I. A., Uvaysov S. U. Organizatsiya svyazi na osnove prioriteto dlya uluchsheniya EMS pri informatsionnom obmene v detsentralizovannoy seti [The organization of communication on the basis of priorities for improvement EMS at information exchange in the decentralized network]. *Tekhnologii elektromagnitnoy sovmestimosti* [Technologies of Electromagnetic Compatibility], 2013, no. 4 (47), pp. 5–8.
2. Azizov R. F., Aminev D. A., Uvaysov S. U. Programmnaya integratsiya elementov uzla detsentralizovannoy seti [Program integration of knot elements of the decentralized network]. *Innovative Information Technologies. Materials of the International scientific – practical conference*, Praga, 2013, part 3, pp. 23–26.
3. Sivagina Yu. A., Grab I. D., Goryachev N. V., Yurkov N. K. Obzor sovremennykh simpleksnykh retranslyatorov radiosignalov [Review of modern simplex repeater radio]. *Nadezhnost i kachestvo : trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and Quality. Proceedings of the International Symposium], 2012, vol. 1, pp. 74–76.
4. Streltsov N. A., Goryachev N. V., Trusov V. A. SDR-transivery i ikh primeneniye [SDR-transceivers and their application]. *Nadezhnost i kachestvo : trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and Quality. Proceedings of the International Symposium], 2014, vol. 1, pp. 281–282.
5. Tanenbaum E., Uezeroll D. *Kompyuternye seti* [Computer networks], 5th ed. Saint Petersburg, Piter Publ., 2012. 960 p.
6. Finogeev A. G., Nefedova I. S., Finogeev Ye. A., Kuang Vin Tkhai, Kamaev V. A., Shevchenko S. V., Finogeev A. A. Analiz dannykh v sisteme dispetcherizatsii gorodskogo teplosnabzheniya [The analysis of data in system of scheduling of city heat supply]. *Prikaspiyskiy zhurnal: upravleniye i vysokie tehnologii* [Caspian Journal: Management and High Technologies], 2014, no. 2 (26), pp. 182–196.
7. Yurkov N. K. Otsenka bezopasnosti slozhnykh tekhnicheskikh system [The safety assessment of complex technical systems]. *Nadezhnost i kachestvo : trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and Quality. Proceedings of the International Symposium], 2013, no. 1, pp. 11–16.
8. Aminev D., Azizov R., Uvaysov S. Recommendations for the choice of antenna transceivers of decentralized self-organizing networks. *Innovatsii na osnove informatsionnykh i kommunikatsionnykh tekhnologiy : materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Innovations on the Basis of Information and Communication Technologies. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference], Moscow, Moscow State Institute of Electronics and Mathematics, National Research University "Higher School of Economics" Publ. House, 2013, pp. 480–481.
9. Bushmelev P. E., Bushmeleva K. I., Plyusnin I. I., Uvaysov S. U. Modeling the optimal parameters for a remote sensing device. *Measurement Techniques*, 2011, vol. 54, no. 3, pp. 294–299.
10. *Information Technology – Telecommunications and Information Exchange Between Systems – Local and Metropolitan Area Networks – Specific Requirements – Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)*, Amendment, Alternative Physical Layer Extension to Support the Japanese 950MHz Band. Note: supplement to ANSI/IEEE 802.15.4-2006* Approved 2009-07-28.