

УДК 004.855

DOI: 10.25559/SITITO.14.201803.686-691

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ БЕСПРОВОДНЫХ ИНТЕРНЕТ УСТРОЙСТВ С РАЗЛИЧНЫМИ ПРОТОКОЛАМИ ЯЧЕЙСТОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ

Ю.А. Ушаков, М.В. Ушакова

Оренбургский государственный университет, г. Оренбург, Россия

## RESEARCH WORK OF WIRELESS INTERNET DEVICES WITH DIFFERENT MESH ROUTING PROTOCOLS

Yury A. Ushakov, Margarita V. Ushakova

Orenburg State University, Orenburg, Russia

© Ушаков Ю.А., Ушакова М.В., 2018

### Ключевые слова

Беспроводные сети, интернет вещей, самоорганизующиеся сети, маршрутизация, программно-конфигурируемые сети.

### Аннотация

Современный уровень развития беспроводных устройств позволяет использовать дешевый беспроводной интерфейс практически в любых областях электроники, где раньше использовались преимущественно проводные решения. Многие объекты дополнительно используют множество беспроводных устройств контроля и управления объектами, беспроводные реле, замки, видеонаблюдение. Перекрытие частотных устройств в открытых диапазонах имеет повсеместное распространение, эти устройства перестают работать на дальние расстояния или вообще не принимают запросы. Работа посвящена исследованию Mesh сетей с традиционным способом маршрутизации AODV и с разработанным ранее способом на основе PainlessMesh и программно-конфигурируемых сетей. В качестве объекта исследования выбраны IoT устройства, используемые на больших по площади объектах. Будет проведено исследование потери пакетов и задержки при передаче пакетов по обоим исследуемым протоколам.

### Keywords

Wireless networks, Internet of things, self-organizing networks, routing, software-defined network.

### Abstract

The current level of development of wireless devices makes it possible to use a cheap wireless interface in virtually all areas of electronics, where previously mainly wired solutions were used. Many objects additionally use a lot of wireless control and management devices, wireless relays, locks, video surveillance. Overlapping of frequency devices in open bands is widespread, these devices stop working for long distances or do not accept requests at all. The work is devoted to the study of Mesh networks with the traditional method of routing AODV and with the previously developed method based on PainlessMesh and software-configurable networks. As an object of research, IoT devices are used, used in large-scale objects. A study will be made of the loss of packets and the delay in the transmission of packets for both protocols under investigation.

### Об авторах:

**Ушаков Юрий Александрович**, кандидат технических наук, доцент, кафедра геометрии и компьютерных наук, Оренбургский государственный университет (460000, Россия, г. Оренбург, пр. Победы, д. 13), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0474-8919>, unpk@mail.ru

**Ушакова Маргарита Викторовна**, старший преподаватель кафедры геометрии и компьютерных наук, Оренбургский государственный университет (460000, Россия, г. Оренбург, пр. Победы, д. 13), ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4462-9946>, m.v.ushakova@mail.ru



## Введение

Уже наступила эра Интернета вещей (Internet of Things, IoT) в корпоративных и домашних сетях, теперь очередь производств и заводов [1]. IoT устройства управляются и контролируются дистанционно с использованием беспроводных коммуникаций.

Конечные точки чаще всего работают в условиях ограниченных ресурсов, включая вычислительные мощности, объемы памяти и энергопотребление. Для них может быть очень сложно или даже невозможно использовать такие технологии, как выделенные чипы безопасности, контроль привилегий, защиту памяти или виртуализацию. Кроме того, недостаток ресурсов может приводить к слабой устойчивости к атакам, направленным на отказ в обслуживании. Вопрос дополнительно усложняется тем, что все чаще устройства основаны на собственных достаточно сложных микроконтроллерах и поддерживают удаленное обновление встроенного программного обеспечения. Так что встают задачи по обеспечению контроля корректности работающего на устройствах кода. В качестве одного из вариантов предлагаются системы обеспечения доверенной среды исполнения, основанные на аппаратно-программных решениях.

В условиях высокой конкуренции за частоту и среду передачи, имея ограничения на использование энергии, испытывая необходимость поддерживать качество обслуживания и обеспечивать совместимость с существующим и решениями, такая беспроводная сеть должна работать в соответствии с рядом стандартов, которые при реализации иногда не совместимы друг с другом [2]. Решения, описанные для сенсорных сетей в стандарте IEEE 802.15.5, не подходят для сетей Wi-Fi по причине отсутствия необходимых механизмов в самом протоколе IEEE 802.11. Mesh технологии самоорганизации и маршрутизации в произвольных беспроводных сетях не учитывают специфику носимых и автономных устройств с ограниченными вычислительными и энергетическими возможностями. Существующие решения для сетей Wi-Fi, связанные с увеличением плотности клиентов, как правило, требуют изменения в драйверах устройств или замену передающих модулей.

Для автономных беспроводных устройств были разработаны специальные протоколы на базе стандарта IEEE 802.15.5, в котором описана реализация самоорганизующейся сети с резервированием каналов, автоматической децентрализованной адресацией и маршрутизацией всех видов трафика. Алгоритмы маршрутизации в стандарте IEEE 802.15.5 позволяют устройствам узнать о маршрутах не далее двух соседей, что определяет радиус непосредственного выбора пути. В дерево маршрутизации добавляются связи с наивысшим качеством, при этом не учитывается мощность передатчиков, требования качества и задержки, возможность параллельной передачи трафика.

Промышленные сети датчиков и IoT используют специализированные версии беспроводных протоколов, совместимых с CAN, Modbus и подобными системами [3]. Проблемы протоколов в современных промышленных системах IoT (IIoT) [4] не сводятся только к несовместимости стандартов. Возможность конфликта одновременного доступа к виртуальным портам, проводные IP шлюзы для датчиков, ограниченные очереди запросов, совместимость со SCADA системами делают промышленные IoT устройства гораздо сложнее в интеграции, чем традиционные.

В настоящее время для решения задач маршрутизации и обеспечения QoS активно используются технологии программно-конфигурируемых сетей (ПКС) [5].

Для моделирования передачи информации по сетям с периодическим включением и случайными окнами передачи можно использовать имитационное моделирование или аппроксимационные методы теории массового обслуживания на срезах состояния сети. Вопросы разработки аппроксимационных методов и алгоритмов при исследовании сетей передачи данных на основе сетей массового обслуживания широко исследованы многими учеными, однако классические методы подразумевают использование только математического ожидания времени между заявками и оперируют пуассоновскими потоками событий. Трафик компьютерных сетей не может адекватно описываться пуассоновскими моделями, так как они приводят к слишком оптимистичным результатам по задержкам. При анализе компьютерных сетей необходимо учитывать вторые и третьи моменты распределения времен поступления и обслуживания, особенно для тяжеловесных распределений.

В целом имеются все предпосылки для создания беспроводных сетей автономных IoT-подобных устройств, полностью совместимых с существующим беспроводными сетями, но имеющими единообразный интерфейс доступа и управления. Такие сети могут быть самоорганизующиеся, но с учетом доступных вычислительных ресурсов устройств.

## Анализ существующих решений

«Мобильная сеть ad hoc» (MANET) - это автономная система мобильных маршрутизаторов (и связанных с ними узлов), соединенных беспроводными каналами связи. Маршрутизаторы могут свободно перемещаться произвольно и организовывать себя произвольно; таким образом, беспроводная топология сети может быстро и непредсказуемо изменяться.

Маршрутизация в MANET зависит от многих факторов, включая топологию или выбор маршрутизаторов. Основная проблема заключается в том, что узел, по крайней мере, должен знать информацию о достижимости своим соседям для определения маршрута пакета, в то время как топология сети в MANET часто изменяется. Обнаружение маршрута выполняется с использованием пакетов запроса маршрута (RREQ) и RREP. Они пытаются использовать пропускную способность сети, создавая маршруты только по желанию узла-источника. Следовательно, обнаружение маршрута происходит по требованию. Примерами реактивных протоколов маршрутизации ad hoc являются протокол динамической маршрутизации для мобильных ad-hoc сетей AODV, алгоритм маршрутизации с временным порядком TORA, динамическую маршрутизацию источника (DSR), динамический протокол маршрутизации MANET On-demand (DYMO).

Протоколы маршрутизации AODV (Ad Hoc On-demand Distance Vector) и DYMO (Dynamic MANET On-demand) являются протоколами реактивной маршрутизации. Протокол AODV считается законченным и описан в [6]. В отличие от него протокол DYMO находится на стадии разработки и требует испытаний [7].

Протокол маршрутизации AODV [6] обеспечивает обнаружение маршрута по требованию в мобильных сетях ad hoc. Как и большинство реактивных протоколов маршрутизации, поиск маршрута основан на цикле обнаружения маршрута,



включающем широковещательный сетевой поиск и одноадресный ответ, содержащий обнаруженные пути. AODV полагается на порядковые номера для каждого узла для свободы цикла и для обеспечения выбора самого последнего пути маршрутизации. Узлы AODV поддерживают таблицу маршрутов, в которой хранится информация маршрутизации следующего шага для узлов назначения. Каждая запись таблицы маршрутизации имеет связанное с ней значение времени жизни. Если маршрут не используется в течение срока службы, маршрут истек. В противном случае каждый раз, когда используется маршрут, период жизни обновляется, чтобы маршрут не был удален преждевременно.

Динамический протокол маршрутизации MANET по требованию (DYMO) является преемником протокола маршрутизации AODV. Он работает аналогично AODV. DYMO не добавляет дополнительных функций и не расширяет протокол AODV, а упрощает его, сохраняя основной режим работы. Как и во всех реактивных протоколах ad hoc маршрутизации, DYMO состоит из двух протокольных операций: обнаружения маршрута и обслуживания маршрута. Маршруты обнаруживаются по требованию, когда узлу необходимо отправить пакет адресату, который в настоящее время не находится в его таблице маршрутизации. Сообщение с запросом маршрута заливается в сеть с использованием широковещательной передачи, и если пакет достигает своего адресата, обратно отправляется ответное сообщение, содержащее обнаруженный накопленный путь. Каждая запись в таблице маршрутизации состоит из следующих полей: адрес получателя, порядковый номер, количество хопов, адрес следующего хопа, интерфейс следующего хопа, шлюз, префикс и тайм-аут удаления.

OLSR (Optimized Link State Routing) – один из наиболее популярных в мире протоколов маршрутизации состояния канала с открытым исходным кодом. OLSR с расширением качества канала (LQ) и алгоритмом fish-eye работает достаточно хорошо. Протокол OLSR является проактивным протоколом маршрутизации, который создает маршрут для передачи данных, поддерживая таблицу маршрутизации внутри каждого узла сети. Таблица маршрутизации вычисляется исходя информации о топологии, обмен которой происходит с помощью пакетов управления топологией (ТС, Topology Control). Пакеты ТС, в свою очередь, создаются после того, как каждый узел заполнит свой список соседей. Этот список содержит идентификатор соседних узлов. Узел считается соседом тогда и только тогда, когда он может быть достигнут через двунаправленную связь.

Основной недостаток OLSR – проблема синхронизации между сообщениями топологии и информацией о маршрутизации, хранящейся внутри каждого узла. Другими словами, таблицы маршрутизации не всегда соответствуют фактической топологии сети. Для решения этой проблемы, связанной с петлями маршрутизации, был введен BATMAN. В BATMAN отсутствует распространение сообщений о топологии. Каждый узел выполняет следующие операции: рассылает рекламные сообщения OGM, содержащий IP-адрес отправителя, IP-адрес узла пересылки, значение Time To Live (TTL) и возрастающий порядковый номер (SQ); с помощью процедуры ранжирования определяет лучшего соседа по одному хопу для каждого (известного) адресата в сети; ретранслирует сообщение OGM, через лучшего соседа.

Поскольку топология сети часто изменяется из-за ограничений мобильности узлов и мощности, необходимы эффективные протоколы маршрутизации для организации и

поддержания связи между узлами.

Нами предложен алгоритм маршрутизации на базе Painless mesh с удалением уровня IP из самоорганизующейся сети и присутствии его только в шлюзах до IP сети. Маршрутизация происходит по схожим с DYMO принципам, но использует физические адреса и ID контроллеров. Такое решение позволяет не вносить излишние накладные расходы и эффективно работает в условиях меняющейся топологии. Этот протокол может быть использован совместно с WiFi и IoT.

## Цель исследования

Необходимо исследовать эффективность и надежность передачи данных при реализации сети на основе AODV и на основе разработанного метода на базе PainlessMesh. Для этого должны быть решены задачи синтеза топологии, планирования эксперимента, прогона серии экспериментов и анализ результатов.

По результатам моделирования необходимо сделать выводы о целесообразности использования нового метода в сетях с высокой вероятностью потери пакетов.

## Планирование эксперимента

Для экспериментальных исследований была выбрана среда моделирования OMNeT++, представляющую собой библиотеку моделирования и фреймворк для создания сетевых симуляторов. Данная среда охватывает проводные и беспроводные сети связи, внутрисетевые сети, сети очередей и т.д. Она включает такие специфичные функции, как поддержка сенсорных сетей, беспроводных сетей ad-hoc, интернет-протоколов, моделирование производительности, фотонных сетей и т.д. OMNeT++ предлагает интегрированную среду Eclipse, графическую среду выполнения и множество других инструментов.

Для исследования эффективности и надежности алгоритмов была создана модель сети, состоящей из 20 хостов, равномерно расположенных на площади 1000м x 1000 м (рисунок 1). Кроме того, были использованы 3 маршрутизатора. Хосты и маршрутизаторы работают на основе inet.linklayer.ieee80211.Ieee80211Nic, в режиме adHoc.

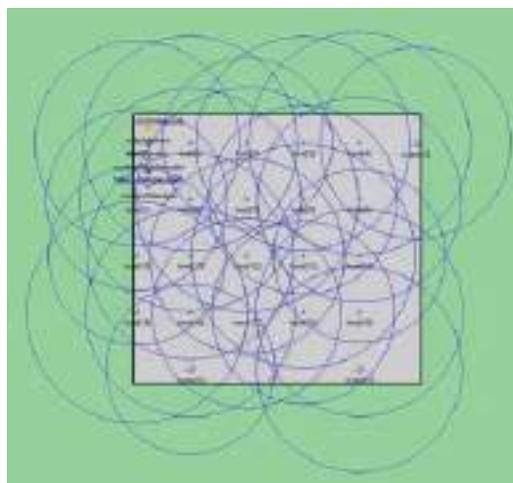


Рис. 1. Схема расположения устройств  
Fig. 1. Device location diagram



На рисунке 2 показана топология моделируемой сети. Каждый узел периодически обменивается с соседями таблицей маршрутизации и hello-пакетами, которые эмулируются через L2 ping.

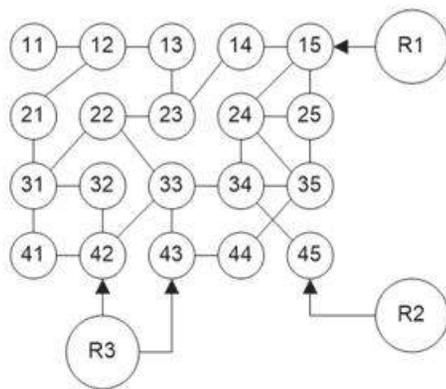


Рис. 2. Топология сети  
Fig. 2. Network Topology

Для симуляции были заданы параметры, показанные в таблице 1. Данные параметры являются статическими для всех экспериментов.

Таблица 1. Параметры симуляции  
Table 1. Simulation options

Параметр	Значение
Количество хостов	20
Количество маршрутизаторов	3
Площадь	1000*1000 м
Время симуляции	300 сек.
bitrate	54 Mbps
Максимальное значение интерференции	50 м
Размер передаваемых пакетов	500-1400б
Время запуска приложений на хостах startTime	uniform(1s,10s)
Время запуска приложений на роутерах startTime	uniform(1s,10s)
Интервал опроса датчиков с маршрутизаторов sendInterval	exponential(1000ms)

Для эмуляции общей загрузки сети хосты будут обмениваться трафиком со следующими интервалами времени между пакетами: 500, 750, 1000 мс по топологии каждый каждому.

Каждая серия прогонов будет выполнена для узлов на базе AODV и для узлов на базе разработанного алгоритма. Поскольку разработанный алгоритм не использует IP стек, в качестве получателей пакетов будет использован адрес второго уровня (MAC), а в эксперименте AODV адрес IPv4.

Из всех собранных результатов в каждом прогоне каждого эксперимента будут выбраны для анализа такие параметры как: время отклика, количество потерянных пакетов, задержки в очереди. Из вычисленных при моделировании параметров будут использованы среднее время отклика и его статистическое распределение.

## Полученные результаты

В результате прогона серии экспериментов были получены данные, сохраненные для дальнейшей обработки. Требуемые параметры были экспортированы для обработки в Excel.

Первый эксперимент был поставлен при интенсивности генерации пакетов 1/1000 мс с экспоненциальным распределением времени между пакетами. На рисунке 3 показаны графики времени отклика при заданных параметрах для протокола AODV и разработанного протокола маршрутизации на базе Painless mesh.



Рис. 3. Результаты измерения задержки при среднем времени между пакетами 1 сек.

Fig. 3. The measurement results of the delay when the average time between packets is 1 sec.

Как видно из графика, алгоритм AODV имеет существенно более высокие показатели времени отклика и больший джиттер.

Второй эксперимент был поставлен при интенсивности генерации пакетов 1/750 мс с экспоненциальным распределением времени между пакетами. На рисунке 4 показаны графики времени отклика при заданных параметрах для протокола AODV и разработанного протокола маршрутизации на базе Painless mesh.



Рис. 4. Результаты измерения задержки при среднем времени между пакетами 750 мс.

Fig. 4. The measurement results of the delay when the average time between packets is 750 msec.

При таких параметрах для обоих алгоритмов время отклика сопоставимо и джиттер имеет примерно одинаковый порядок.

Третий эксперимент был поставлен при интенсивности генерации пакетов 1/500 мс с экспоненциальным распределением времени между пакетами. На рисунке 5 показаны графики времени отклика при заданных параметрах для протокола AODV и разработанного протокола маршрутизации на базе Painless mesh.





Рис. 5. Результаты измерения задержки при среднем времени между пакетам 500 мс.

Fig. 5. The measurement results of the delay when the average time between packets is 500 msec.

Измерения потери пакетов показали небольшое уменьшение потери пакетов при переходе на новый протокол (таблица 2).

Таблица 2. Потери пакетов при различных значениях средних интервалов времени между пакетами

Table 2. Packet loss for different values of average time intervals between packets

	При 1000мс	При 750 мс	При 500 мс
Протокол AODV	63 (21%)	104 (34%)	253 (84%)
Протокол на базе Painless Mesh	26 (8%)	50 (16%)	79 (26%)

Как видно из таблицы, на низких нагрузках протоколы ведут себя схоже, однако при повышении нагрузки потери у протокола на базе PainlessMesh существенно ниже.

## Заключение

В результате экспериментальных исследований эффективности реактивных протоколов маршрутизации AODV и разработанного протокола маршрутизации на базе Painless mesh, было выявлено следующее.

Производительность сети оценивается с точки зрения отношения к пакетной доставке, средней сквозной задержки, пропускной способности и наложенной маршрутизации, когда какой либо процент узлов не работает из за интерференции или помех. Результаты моделирования показывают, что хотя производительность обоих протоколов маршрутизации ухудшается по мере возрастания фоновой нагрузки на сеть, разработанный протокол маршрутизации на базе Painless Mesh оказывается более надежным с точки зрения проверенных показателей производительности. Пропускная способность разработанного протокола на базе Painless mesh и протокола AODV имеет одинаковый порядок, а джиттер увеличивается для AODV.

Изменения задержки пакетов или джиттера становятся более предсказуемыми, механизмы маршрутизации могут влиять на эту задержку, чтобы определить, потерян ли пакет или нет. Основываясь на анализе результатов моделирования ясно, что разработанный протокол маршрутизации на баз Painless mesh более эффективен.

## Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Оренбургской области и РФФИ (проекты №18-47 560017 и №18-37-00485).

## Список использованных источников

- [1] IBM Watson IoT – Industry 4.0 and Connected Manufacturing. 2017. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ibm.com/internet-of-things/iot-solutions/iot-manufacturing> (дата обращения: 12.08.2018).
- [2] Dzal G.I.M., Feng S., Tang W., Feng W., Liu Y. Joint Fair Resource Allocation for Multi-radio Multi-channel Mesh Networks with Flow Demand Constraint // Proceedings of the Fourth International Conference on Communication Systems and Network Technologies. Bhopal, 2014. Pp. 233-238. DOI: 10.1109/CSNT.2014.248
- [3] Industrial Internet of Things – IIoT Промышленный интернет вещей в России // TAdviser. 2018. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:IIoT\\_-\\_Industrial\\_Internet\\_of\\_Things\\_\(Промышленный\\_интернет\\_вещей\)](http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:IIoT_-_Industrial_Internet_of_Things_(Промышленный_интернет_вещей)) (дата обращения: 12.08.2018).
- [4] MQTT и Modbus: сравнение протоколов, используемых в шлюзах для IoT // Хабр. 2016. [Электронный ресурс]. URL: <https://habrahabr.ru/company/intel/blog/304228> (дата обращения: 12.08.2018).
- [5] Смелянский Р.Л. Настоящее и будущее SDN & NFV // Первая миля. 2016. № 3. С. 78-85. URL: [http://www.lastmile.su/files/article\\_pdf/5/article\\_5241\\_274.pdf](http://www.lastmile.su/files/article_pdf/5/article_5241_274.pdf) (дата обращения: 12.08.2018).
- [6] Perkins C. Belding-Royer E., Das S. Ad Hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. RFC Editor, 2003. 37 p. URL: <http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt> (дата обращения: 12.08.2018).
- [7] Chakeres I., Perkins C. Dynamic MANET On-Demand (DYMO) Routing // IETF Internet Draft. 2010. Vol. 21. 40 p. URL: <https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-manet-dymo-21> (дата обращения: 12.08.2018).

Поступила 12.08.2018; принята в печать 10.09.2018; опубликована онлайн 30.09.2018.

## References

- [1] IBM Watson IoT – Industry 4.0 and Connected Manufacturing. 2017. Available at: <https://www.ibm.com/internet-of-things/iot-solutions/iot-manufacturing> (accessed 12.08.2018).
- [2] Dzal G.I.M., Feng S., Tang W., Feng W., Liu Y. Joint Fair Resource Allocation for Multi-radio Multi-channel Mesh Networks with Flow Demand Constraint. *Proceedings of the Fourth International Conference on Communication Systems and Network Technologies*. Bhopal, 2014, pp. 233-238. DOI: 10.1109/CSNT.2014.248
- [3] Industrial Internet of Things – IIoT Industrial Internet of Things in Russia. *TAdviser*. 2018. Available at: [http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:IIoT\\_-\\_Industrial\\_Internet\\_of\\_Things\\_\(Промышленный\\_интернет\\_вещей\)](http://www.tadviser.ru/index.php/Статья:IIoT_-_Industrial_Internet_of_Things_(Промышленный_интернет_вещей)) (accessed 12.08.2018). (In Russian)
- [4] MQTT и Modbus: protocol comparison used in gateways for IoT // *Habr*. 2016. Available at: <https://habrahabr.ru/company/intel/blog/304228> (accessed 12.08.2018). (In Russian)
- [5] Smelyansky R. Present and future of SDN&NFV. *Last Mile*.



- 2016; 3:78-85. Available at: [http://www.lastmile.su/files/article\\_pdf/5/article\\_5241\\_274.pdf](http://www.lastmile.su/files/article_pdf/5/article_5241_274.pdf) (accessed 12.08.2018). (In Russian)
- [6] Perkins C. Belding-Royer E., Das S. Ad Hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. *RFC Editor*. 2003. 37 p. Available at: <http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt> (accessed 12.08.2018).
- [7] Chakeres I., Perkins C. Dynamic MANET On-Demand (DYMO) Routing. IETF Internet Draft. 2010. Vol. 21. 40 p. Available at: <https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-manet-dymo-21> (accessed 12.08.2018).

Submitted 12.08.2018; revised 10.09.2018;  
published online 30.09.2018.

#### About the authors:

**Yury A. Ushakov**, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor at the Department of Geometry and Computer Science, Orenburg State University (13 Pobeda Av., Orenburg 460000, Russia), ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0474-8919>, [unpk@mail.ru](mailto:unpk@mail.ru)

**Margarita V. Ushakova**, Lecturer at the Department of Geometry and Computer Science, Orenburg State University (13 Pobeda Av., Orenburg 460000, Russia), ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4462-9946>, [m.v.ushakova@mail.ru](mailto:m.v.ushakova@mail.ru)



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>), which permits unrestricted reuse, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

