

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ MODELING AND SIMULATION

doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-762-770

УДК 004.75

Имитационно-аналитическая модель надежности с возможной репликацией передач в реконфигурируемой многопутевой беспроводной сети

Евгения Александровна Абрамова¹, Владимир Анатольевич Богатырев²✉

^{1,2} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

² Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация

¹ Vectra4444@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5637-7427>,

² vladimir.bogatyrev@gmail.com ✉, <https://orcid.org/0000-0003-0213-0223>

Аннотация

Введение. Рассмотрены методы обеспечения и оценки надежности беспроводных реконфигурируемых многопутевых сетей. Отказоустойчивость многопутевых беспроводных сетей поддерживается с помощью ограниченного числа связанных между собой коммутационных узлов-переключателей, позволяющих проводить реконфигурацию при перераспределении трафика через сохранившие связанность сегменты путей. Целью работы является повышение надежности передачи данных в многопутевых беспроводных сетях. Надежность достигается в результате обоснования выбора места расположения переключателей маршрутов с учетом влияния на вероятности доставки пакетов отказов коммутационных узлов и комбинаций различных препятствий распространения сигналов по совокупности путей связи с адресуемым узлом. Для сравнения решений построения сети предлагается модель, отражающая влияние на надежность передач месторасположения узлов переключателей путей. **Метод.** Исследование надежности беспроводной многопутевой сети основывается на сочетании аналитического и имитационного моделирования. Оценка надежности сети предполагает ее декомпозицию с учетом возможных комбинаций отказов узлов переключателей путей и их влияния на возможности реконфигурации в результате переключения сегментов путей, сохранивших после отказов связанность входящих в их состав узлов. Оценка вероятности потери пакетов при передаче по беспроводным каналам осуществляется в результате имитационного моделирования с использованием инструментальных средств OMNeT++. Предлагаемый подход позволяет совместить оценки надежности структуры сети и процесса передачи данных (доставки пакетов) через нее с учетом отказов узлов, а также постоянных и меняющихся препятствий (условий) распространения сигналов между узлами. **Основные результаты.** Проанализированы возможности повышения надежности беспроводных сетей с многопутевой маршрутизацией в результате оптимизации размещения ограниченного числа узлов межпутевого переключения передач. Предложена имитационно-аналитическая модель надежности беспроводных реконфигурируемых многопутевых сетей, которая учитывает при оценке вероятности доставки пакетов, отказы коммуникационных узлов и потери пакетов при вариациях расположения физических препятствий прохождения сигналов между узлами. Показано, что выбор размещения узлов межпутевого переключения существенно влияет на надежность доставки пакетов. При этом существует оптимальное размещение переключателей, обеспечивающее в зависимости от распределения по путям препятствий передачи сигналов максимум надежности передач. **Обсуждение.** Результаты исследования могут быть применены при прогнозировании надежности и обосновании проектных решений построения отказоустойчивых многопутевых реконфигурируемых беспроводных сетей. В дальнейшем предполагается рассмотреть более сложные топологии сетей с учетом влияния реконфигурации на надежность и на задержки доставки пакетов.

Ключевые слова

надежность, многопутевая маршрутизация, отказоустойчивость, реконфигурация, OMNeT++, беспроводная сеть

Ссылка для цитирования: Абрамова Е.А., Богатырев В.А. Имитационно-аналитическая модель надежности с возможной репликацией передач в реконфигурируемой многопутевой беспроводной сети // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2025. Т. 25, № 4. С. 762–770. doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-762-770

© Абрамова Е.А., Богатырев В.А., 2025

Simulation and analytical model of reliability with possible replication of transmissions in a reconfigurable multipath wireless network

Evgeniya A. Abramova¹, Vladimir A. Bogatyrev²✉

^{1,2} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

² Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI), Saint Petersburg, 190000, Russian Federation

¹ Vectra4444@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5637-7427>

² vladimir.bogatyrev@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0003-0213-0223>

Abstract

Methods for ensuring and evaluating the reliability of wireless reconfigurable multipath networks are considered. The fault tolerance of multipath wireless networks is maintained using a limited number of interconnected switching nodes which allow reconfiguration when traffic is redistributed through the connected path segments. The aim of the work is to increase the reliability of transmissions in multipath wireless networks as a result of justifying the choice of route switches, taking into account the impact on the probability of packet delivery of both failures of switching nodes and combinations of various obstacles to signal propagation along a set of communication paths with the addressable node. To compare network construction solutions, a model is proposed that reflects the influence of the location of path switch nodes on transmission reliability. The study of the reliability of a wireless multipath network is based on a combination of analytical and simulation modeling. An assessment of network reliability involves its decomposition, taking into account possible combinations of failures of path switch nodes and their impact on reconfiguration capabilities as a result of switching path segments that have retained the connectivity of their constituent nodes after failures. The probability of packet loss during transmission over wireless channels is estimated as a result of simulation using OMNeT++ tools. The proposed approach makes it possible to combine estimates of the reliability of the network structure and the process of data transmission (packet delivery) through it, taking into account node failures as well as constant and changing obstacles (conditions) of signal propagation between nodes. The possibilities of increasing the reliability of wireless networks with multipath routing are analyzed as a result of optimizing the placement of a limited number of inter-path gearshift nodes. A simulation and analytical model of the reliability of wireless reconfigurable multipath networks is proposed, which takes into account failures of communication nodes and packet losses with variations in the location of physical obstacles to signal transmission between nodes when assessing the probability of packet delivery. It is shown that the choice of the location of the inter-path switching nodes significantly affects the reliability of packet delivery, while there is an optimal placement of switches, which ensures maximum transmission reliability depending on the distribution of signal transmission obstacles along the paths. The results of the study can be applied in predicting reliability and substantiating design solutions for building fault-tolerant multipath reconfigurable wireless networks. In the future, it is expected to consider more complex network topologies, taking into account the impact of reconfiguration on both reliability and packet delivery delays.

Keywords

reliability, multipath routing, fault tolerance, reconfiguration, OMNeT++, wireless network

For citation: Abramova E.A., Bogatyrev V.A. Simulation and analytical model of reliability with possible replication of transmissions in a reconfigurable multipath wireless network. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2025, vol. 25, no. 4, pp. 762–770 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-762-770

Введение

Высокая надежность распределенных систем возможна при организации связи через избыточную многопутевую сеть с оптимизацией маршрутов и их реконфигурацией при накоплении отказов. В соответствии с концепцией реконфигурируемых сетей Software-Defined Networking предусматривается возможность динамической реконфигурации сети в реальном времени [1, 2], гарантируя, что критически важные потоки, такие как сверхнадежные коммуникации с малой задержкой, получают необходимые ресурсы без снижения допустимого уровня обслуживания других потоков [3]. В работе [4] проанализировано влияние размещения коммутационных узлов на частоту коллизий и помех при передаче данных. Эффективность использования избыточности многопутевых сетей во многом зависит от организации маршрутизации, адаптивной к изменениям трафика, и связанности сети из-за накопления отказов коммутационных узлов. Среди активно применяющихся методов многопутевой маршрутизации выделяется метод на основе алгоритма Route Optimization and Service Assurance

(ROSA), который оптимизирует сетевые пути для классов трафиков Deterministic Networking и Scheduled [5, 6], что обеспечивает передачу потоков с высоким приоритетом по путям с минимальными задержками и низкими потерями. Алгоритм ROSA, перераспределяя потоки по кратчайшим маршрутам, позволяет снизить потребление энергии без ущерба для производительности [7]. В то же время он требует высокой вычислительной мощности для оптимизации маршрутов в реальном времени и сильно зависит от централизованного контроллера, приводящего к риску единой точки отказа. В связи с этим алгоритм ROSA уязвим для кибератак [8] и может отрицательно влиять на надежность сети. Для беспроводных сетей снижение энергопотребления может достигаться при кластеризации, когда множество узлов сети разбивается на кластеры с назначением в каждом из них головного узла, осуществляющего связь внутри кластера и между кластерами [9–13].

Для многопутевых сетей важным является обоснование структурных решений обеспечения их надежности [14–16]. В работах [17–20], рассмотрены дополнительные возможности обеспечения надежности и

своевременности передач пакетов в многопутевых сетях, связанные с оптимальными сегментацией и кратностью репликацией пакетов в зависимости от предельно допустимой задержки их доставки адресату.

Повышение надежности и отказоустойчивости проводных многопутевых сетей при реконфигурации, позволяющей сформировать новые маршруты из сохранившихся связности после отказов сегментов первоначальных путей, исследовано в [21, 22]. Переключение маршрутов реализуется с помощью ограниченного числа связанных между собой коммутационных узлов-переключателей, позволяющих проводить реконфигурацию при формировании обходных маршрутов, используя сохранившие связность сегменты путей. Для многопутевых проводных сетей место размещения ограниченного числа коммуникационных узлов, осуществляющих перераспределение потоков при реконфигурации [21, 22], существенно влияет на надежность и производительность сети.

Целью настоящей работы является исследование возможностей повышения надежности многопутевых беспроводных сетей в зависимости от выбора месторасположения переключателей маршрутов с учетом влияния на вероятности доставки пакетов адресату как отказов коммутационных узлов, так и расположения препятствий распространения сигналов по различным путям связи с адресуемым узлом.

Исследование надежности беспроводной многопутевой сети предлагается провести при сочетании аналитического и имитационного моделирования. Оценка надежности сети опирается на ее декомпозицию с учетом возможных комбинаций отказов узлов переключателей путей и их влияние на возможности реконфигурации с переключением сегментов путей, сохранивших после отказов работоспособность составляющих их узлов. Оценка вероятности потери пакетов при передаче по беспроводным каналам учитывается отдельно в результате имитационного моделирования при различных условиях распространения сигналов. Аналитическую модель структурной надежности в сочетании с результатами имитационного моделирования по оценке вероятности потери пакетов при связи между соседними узлами предлагается использовать при оценке надежности (вероятности успешности) передач от источников пакетов до адресатов. Имитационное моделирование проводится с использованием инструментальных средств OMNeT++ [23].

Предлагаемый подход позволяет совместить оценки структурной надежности сети и надежности процесса передачи данных (доставки пакетов) через нее с учетом структурных отказов узлов, а также постоянных и меняющихся препятствий (условий) распространения сигналов во времени и в пространстве (между различными парами коммутационных узлов), влияющих на вероятность потери пакетов.

Модель надежности беспроводной сети

Структура исследуемой многопутевой сети показана на рис. 1. В сети выделены два базовых пути связи с адресуемым узлом. Будем считать, что верхний и ниж-

ний пути включают одинаковое число коммутационных узлов n . В сети имеется пара узлов-переключателей маршрутов (реконфигураторов), позволяющих перенаправлять потоки запросов между двумя базовыми путями. Общее число узлов, входящих в каждый путь, с учетом переключателя составляет $n + 1$. Число узлов до узла-переключателя путей равно n_1 , а от переключателя до узла адресата (сервера) равно $n - n_1$.

Ставится задача оценки влияния места расположения коммутационных узлов, связывающих разные пути, на надежность сети с учетом физических отказов коммутационных узлов и надежности передач пакетов между парами связанных между собой узлов, составляющих пути. Источники запросов в зависимости от местоположения могут подключаться к одному из двух путей и к обоим одновременно, что обусловлено попаданием сигнала в зону базовых станций. Исследование надежности сети проведено при сочетании аналитической и имитационной моделей. Имитационное моделирование проводится при различных условиях распространения сигналов и привязке расположения узлов на местности.

При моделировании в среде OMNeT++ для каждого узла указывается его местоположение и тип (AomdvRouter). Тип узла показывает, какой базовый модуль будет использоваться при его моделировании, например AdhocHost, WirelessHost, Router, StandartHost и другие.

Модуль AomdvRouter использует весь функционал обычного IP-хоста: стек TCP/IP, UDP, интерфейсы, и т. д. Параметр isRetranslator позволяет задавать логику ретрансляции для узлов-переключателей, а подмодулем маршрутизации выбран базовый модуль AODV. Узел-маршрутизатор подключается к транспортному уровню для корректной передачи сообщений между уровнями стека и организации двухсторонней связи внутри узла. На рис. 2 показана схема модуля AomdvRouter в виде связанных между собой компонентов сети.

Для генерации UDP-трафика в модели используется модуль UdpBasicApp. Пакеты размером 512 Б отправляются с периодичностью 1 с. Имя пакета ControlData позволяет собирать статистику по количеству отправленных, доставленных и потерянных пакетов. Конфигурация источника запросов задается в виде:

```
*.host*.numApps = 1
*.host*.app[0].typename = "UdpBasicApp"
*.host*.app [0].destAddresses = "10.0.020"
*.host*.app [0].destPort = 1000
*.host*.app [0].messageLength = 512 byte
*.host*.app [0].sendInterval = 1 s
*.host*.app [0].packetName = "ControlData"
```

Для приемника применен модуль UdpSink — стандартный компонент из библиотеки INET, предназначенный для получения UDP-пакетов. Он позволяет принимать входящие пакеты на заданном порту, а также может собирать статистику по общему количеству принятых сообщений и временным интервалам между передачами, что дает возможность определить доли доставленных пакетов и измерить среднюю задержку.

Узлы в модели располагаются на определенном расстоянии (160 м) друг от друга, чтобы пакеты передавались только между каждыми двумя соседними

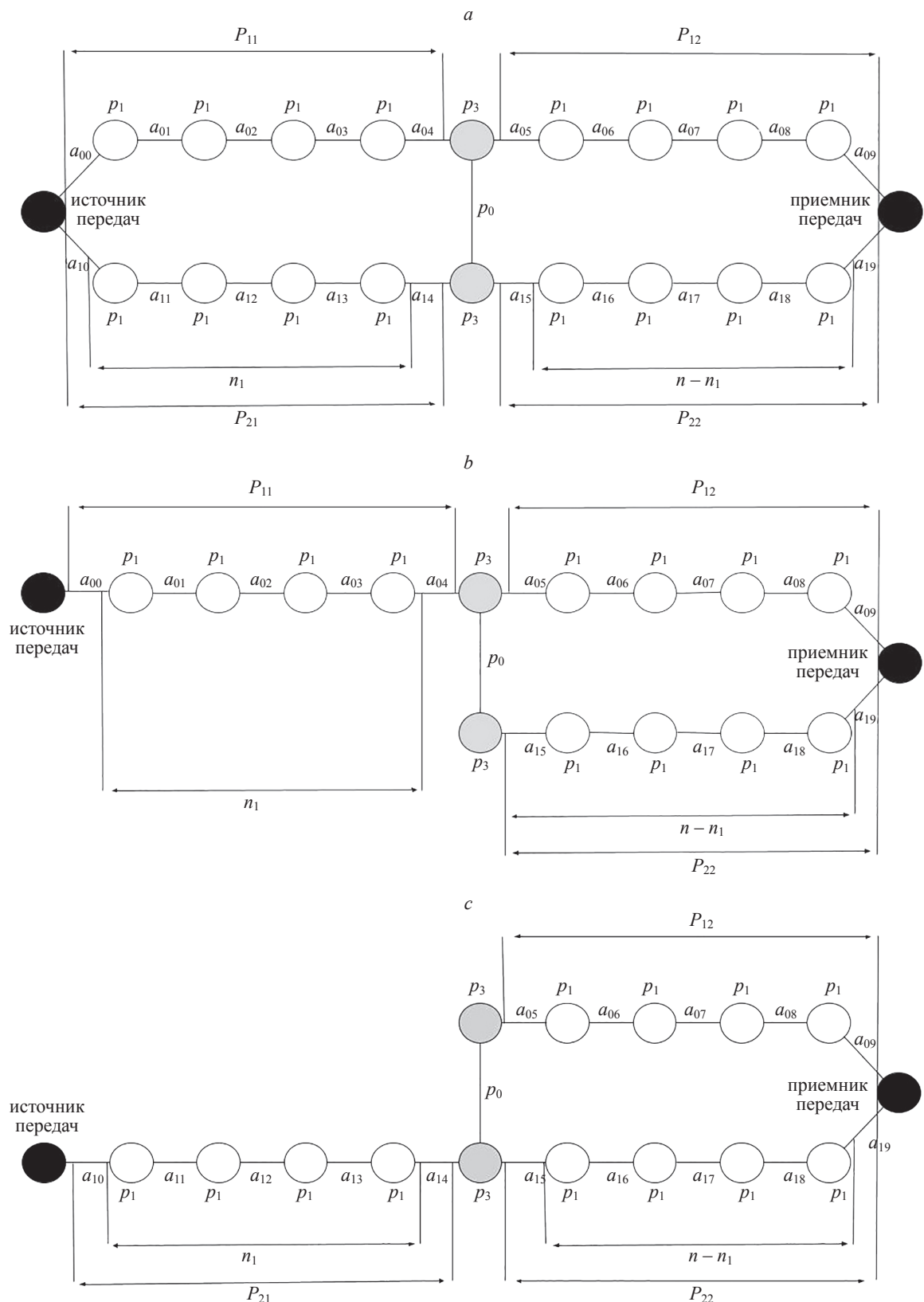


Рис. 1. Варианты связи источника и приемника передач.

$P_{11}, P_{12}, P_{21}, P_{22}$ — вероятности успешной доставки пакетов через соответствующие сегменты сети; $a_{00}-a_{19}$ — вероятности передачи пакетов между узлами; p_0 — вероятность успешности передач пакета между двумя переключателями; p_1 — надежность коммуникационного узла; p_3 — надежность узла переключателя

Fig. 1. Communication options for the transmission source and receiver.

$P_{11}, P_{12}, P_{21}, P_{22}$ — probabilities of successful delivery of packets through the corresponding network segments; $a_{00}-a_{19}$ — probabilities of packet transmission between nodes; p_0 — probability of successful transmission of a packet between two switches; p_1 — reliability of the communication node; p_3 — reliability of the switch node

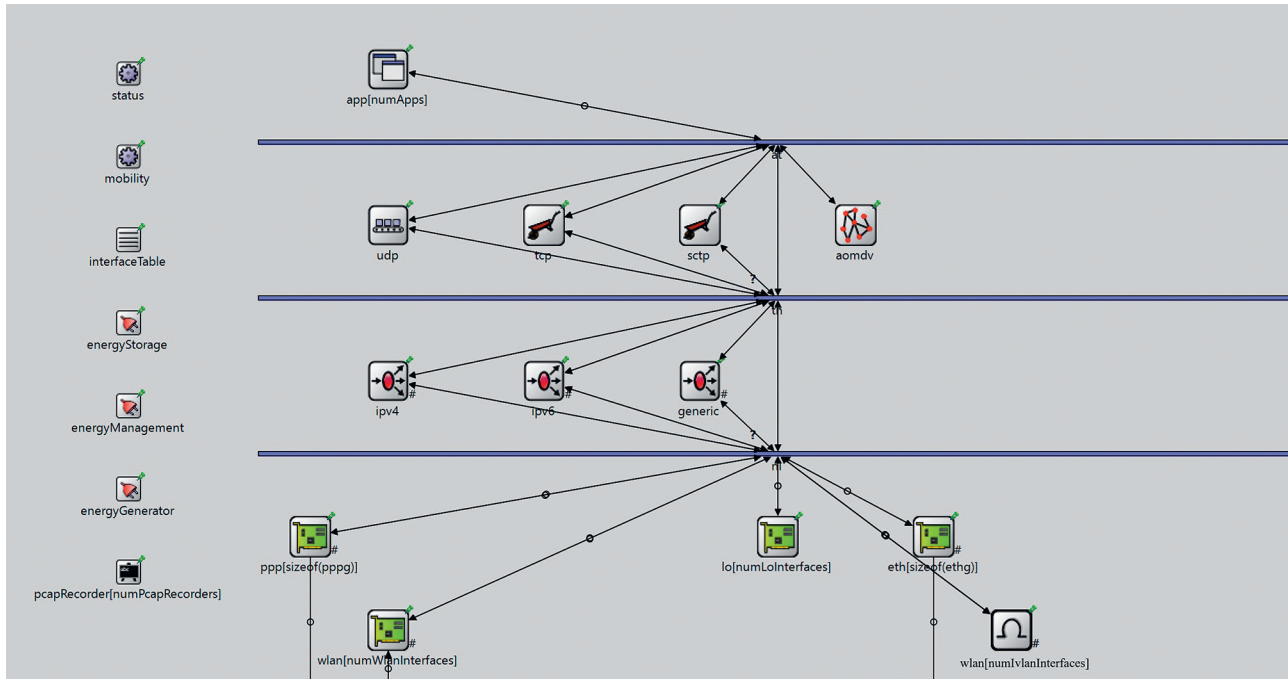


Рис. 2. Представление AomdvRouter в OMNeT++

Fig. 2. Representation of AomdvRouter in OMNeT++

узлами одной линии и имели возможность перейти на другую линию только на узлах-ретрансляторах. Это ограничение в модели учтено при помощи специальных модулей, которые позволяют имитировать особенности распространения сигнала.

Ограничения при передаче сигнала задаются с помощью параметров `communicationRange`, `interferenceRange` и `detectionRange`, которые позволяют повысить точность моделирования беспроводной связи. Диапазон связи (`communicationRange`) — это расстояние, на котором передача данных будет успешна. Диапазон помех (`interferenceRange`) — область, в которой передача может создавать помехи для других устройств, приводить к ошибкам и снижению эффективности передачи данных. За пределами этого диапазона передачи данных не влияют на другие узлы и не препятствуют их работе. Диапазон обнаружения (`detectionRange`) — область, где сигнал передачи может быть обнаружен, но недостаточно силен для успешного декодирования данных.

Значения этих параметров в модели:

```
**radio.transmitter.communicationRange = 180 m
**radio.transmitter.interferenceRange = 400 m
**radio.transmitter.detectionRange = 800 m
```

Для исследуемой сети вероятность доставки пакетов от источников, подключенных только к одному верхнему (P_2) или нижнему (P_3) пути, при возможной репликации передач по сегментам, связывающих узлы переключатели с адресатом, вычисляется как:

$$P_2 = P_{11} [p_3^2 p_0 (1 - (1 - P_{12})(1 - P_{22})) + p_3 (1 - p_0 p_3) P_{12}],$$

$$P_3 = P_{21} [p_3^2 p_0 (1 - (1 - P_{12})(1 - P_{22})) + p_3 (1 - p_0 p_3) P_{22}].$$

Для источников, которые могут быть подключены как к первому, так и ко второму пути:

$$P_1 = p_3^2 p_0 (1 - (1 - P_{11})(1 - P_{21}))(1 - (1 - P_{12})(1 - P_{22})) +$$

$$+ p_3^2 (1 - p_0) (1 - (1 - P_{11} P_{12})(1 - P_{21} P_{22})) +$$

$$+ 2p_3 (1 - P_3) ((P_{11} P_{12} + P_{21} P_{22})).$$

При этом $P_{11} = p_1^{n_1} P_{011}$, $P_{21} = p_1^{n_1} P_{021}$, $P_{12} = p_1^{n-n_1} P_{012}$, $P_{22} = p_1^{n-n_1} P_{022}$, где P_{011} , P_{012} , P_{021} , P_{022} — вероятности доставки пакетов в каждом из сегментов, получаемые в результате имитационного эксперимента.

Если узлы переключатели маршрутов связаны между собой через группу n_0 последовательно соединенных коммутационных узлов, то $p_0 = (p_1 a_0)^{n_0}$, a_0 — вероятность передачи пакетов между соседними коммутационными узлами.

При неоднородности препятствий между соседними узлами вероятности передач между узлами по двум основным путям характеризуются матрицей $\|a_{ij}\|_{2 \times (n+2)}$, по которой:

$$P_{11} = p_1^{n_1} \prod_{j=0}^{n_1} a_{0,j}, \quad P_{12} = p_1^{n-n_1} \prod_{j=n_1}^{n+1} a_{0,j},$$

$$P_{21} = p_1^{n_1} \prod_{j=0}^{n_1} a_{1,j}, \quad P_{22} = p_1^{n-n_1} \prod_{j=n_1}^{n+1} a_{1,j}.$$

В качестве обобщающего критерия надежности передач используется средняя вероятность доставки пакета адресату: $P = P_1 a_1 + P_2 a_2 + P_3 a_3$, где a_1 , a_2 , a_3 — доли трафика от источников, подключенных к первому, второму и обоим путям, $a_1 + a_2 + a_3 = 1$.

Расчет проведен при $n = 20$ узлах, составляющих каждый путь, при интенсивности отказов $\lambda = 10^{-4}$ 1/ч и интенсивности восстановления $\mu = 0,1$ 1/ч. Надежность узлов определяется по коэффициенту готовности: $p_1 = p_3 = \mu / (\lambda + \mu)$.

Для определения задержки и ослабления сигнала с учетом препятствий распространения электромагнитных волн в диэлектрических средах при моделировании в OMNeT++ (INET) использован класс DielectricObstacleLoss.

Экспериментальная оценка вероятности успешной доставки пакетов

Результаты оценки вероятности P успешной доставки пакетов адресату в зависимости от числа узлов n_1 до узла-переключателя с учетом возможных отказов узлов представлены на рис. 3, на котором семейство кривых, отражает зависимость вероятности доставки $P(n_1, a_3, a_1, a_2)$. Расчеты проведены при $P_{011} = 0,998$, $P_{012} = 0,992$, $P_{021} = 0,995$, $P_{011} = 0,989$ вероятностях доставки пакетов в сегментах путей в модели без препятствий (определяемые при имитационном моделировании).

В следующем эксперименте смоделировано распространение сигнала в беспроводной сети с учетом расположения узлов второго пути среди хвойного леса. Каждый участок леса моделируется как область с радиусом 35 м, расположенная между каждой парой узлов на одном пути (рис. 4). Значение dielectricLossTangent для каждой области препятствий принимается равным 0,8 дБ/м, значение propagationSpeed — $2,2 \cdot 10^8$ м/с. Полученные с помощью имитационной модели вероятности доставки пакетов для сегментов путей: $P_{011} = 0,998$, $P_{012} = 0,997$, $P_{021} = 0,992$, $P_{022} = 0,97$.

Расчеты, выполненные с учетом передач в условиях тумана и в городской среде, подтверждают установленный вид зависимостей вероятности доставки пакетов от числа узлов до переключателей путей.

Представленные расчеты показывают существование оптимального расположения узлов переключателей, при котором достигается максимальная надежность по доставке пакетов адресату. Выбор наилучшего расположения переключателей зависит от характеристик окружающей среды, в том числе погодных условий и наличия физических препятствий. Следует заметить, что при выборе стационарного размещения узлов переключателей в основном должны быть учтены расположение постоянных препятствий, а погодные условия могут быть дополнительно учтены статистически при постановке задачи принятия решений в условиях неопределенности.

Обсуждение результатов

Новизна исследований заключается в том, что на основе предложенной имитационно-аналитической модели надежности беспроводных реконфигурируемых многопутевых сетей установлено влияние на связность сети и надежность доставки пакетов месторасположения узлов переключателей путей. Исследование проведено с учетом возможных комбинаций отказов коммуникационных узлов и потери пакетов в зависимости от вариаций расположения препятствий, влияющих на прохождения сигналов между узлами.

Полученные результаты могут быть применены при прогнозировании надежности и обосновании проектных решений построения отказоустойчивых многопутевых реконфигурируемых беспроводных сетей.

В качестве дальнейшего развития работы предполагается рассмотреть более сложные топологии сетей с учетом влияния их реконфигурации как на надежность,

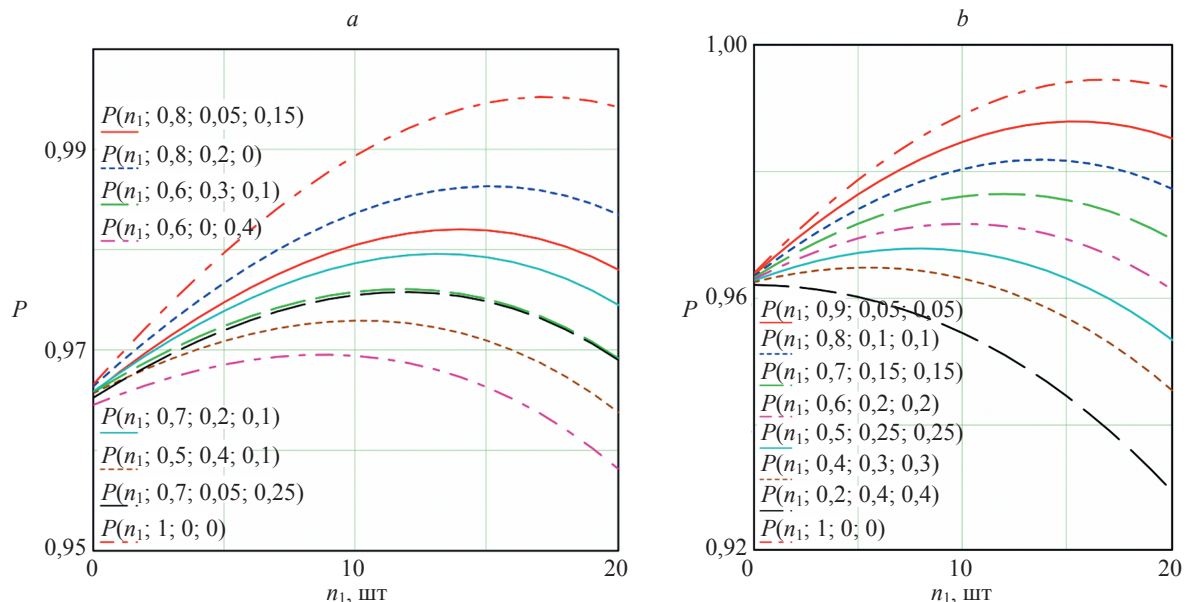


Рис. 3. Зависимости вероятностей доставки пакетов адресату P от числа узлов до переключателей маршрутов (n_1) при равномерном (а) и неравномерном (б) разделении потоков между первым и вторым путями.

a_1, a_2, a_3 — доли пакетов, доступные для передачи от источника по двум путям, и только по первому или второму пути

Fig. 3. Dependence of the probability of packet delivery to the destination P vs. the number of nodes to route switches n_1 with uniform (a) and uneven (b) flow separation between the first and second paths.

a_1, a_2, a_3 — the proportion of packets available for transmission from a source along two paths, and only along the first or second path

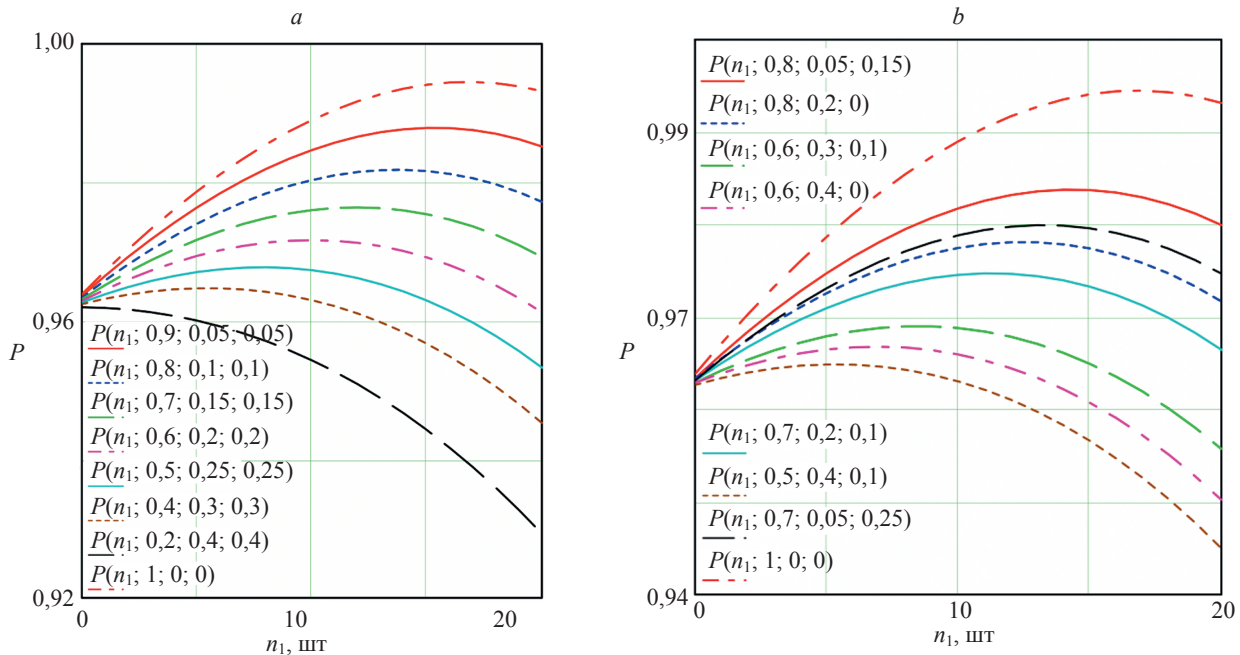


Рис. 4. Зависимости вероятностей доставки пакетов адресату P от числа узлов до переключателей сегментов и долей трафика α при равномерном (а) и неравномерном (б) разделении потоков между первым и вторым путями при расположении части узлов в хвойном лесу

Fig. 4. Dependence of the probability of packet delivery to the addressee P vs. the number of nodes to the switches of segments and the shares of traffic α with uniform (a) and uneven (b) division of flows between the first and second paths when some of the nodes are in a coniferous forest

так и на энергопотребление узлов сети и задержки доставки пакетов.

Заключение

В работе проведено исследование возможностей повышения надежности беспроводных сетей с многопутевой маршрутизацией в результате оптимизации размещения ограниченного числа узлов межпутевого переключения передач.

Предложена имитационно-аналитическая модель надежности беспроводных реконфигурируемых многопутевых сетей, которая учитывает при оценке вероятности доставки пакетов адресату как отказы коммуника-

ционных узлов, так и потери пакетов с учетом вариаций расположения физических препятствий прохождения сигнала.

При построении модели проанализировано влияние вариантов подключения источников передач как с полной, так и с ограниченной доступностью всех маршрутов связи с приемником в беспроводной сети.

Показано, что выбор размещения узлов межпутевого переключения существенно влияет на надежность доставки пакетов приемнику, при этом существует размещение переключателей, обеспечивающее, в зависимости от распределения по путям препятствий передачи сигналов, максимум надежности многопутевых передач.

Литература

1. Liu Y., Liu A., Liu X., Ma M. A trust-based active detection for cyber-physical security in industrial environments // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2019. V. 15. N 12. P. 6593–6603. <https://doi.org/10.1109/tii.2019.2931394>
2. Njah Y., Cheriet M. Parallel route optimization and service assurance in energy-efficient software-defined industrial IoT networks // *IEEE Access*. 2021. V. 9. P. 24682–24696. <https://doi.org/10.1109/tii.2019.2931394>
3. Hashim A., Ayinde B.O., Abido M.A. Optimal placement of relay nodes in wireless sensor network using artificial bee colony algorithm // *Journal of Network and Computer Applications*. 2016. V. 64. P. 239–248. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2015.09.013>
4. Duraipandian M. Performance evaluation of routing algorithm for MANET based on the machine learning techniques // *Journal of Trends in Computer Science and Smart Technology*. 2019. V. 1. N 1. P. 24–35. <https://doi.org/10.36548/jtsst.2019.1.003>

References

1. Liu Y., Liu A., Liu X., Ma M. A trust-based active detection for cyber-physical security in industrial environments. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, vol. 15, no. 12, pp. 6593–6603. <https://doi.org/10.1109/tii.2019.2931394>
2. Njah Y., Cheriet M. Parallel route optimization and service assurance in energy-efficient software-defined industrial IoT networks. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 24682–24696. <https://doi.org/10.1109/tii.2019.2931394>
3. Hashim A., Ayinde B.O., Abido M.A. Optimal placement of relay nodes in wireless sensor network using artificial bee colony algorithm. *Journal of Network and Computer Applications*, 2016, vol. 64, pp. 239–248. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2015.09.013>
4. Duraipandian M. Performance evaluation of routing algorithm for MANET based on the machine learning techniques. *Journal of Trends in Computer Science and Smart Technology*, 2019, vol. 1, no. 1, pp. 24–35. <https://doi.org/10.36548/jtsst.2019.1.003>

5. Zonouz A.E., Xing L., Vokkarane V.M., Sun Y.L. Reliability-oriented single-path routing protocols in wireless sensor networks // *IEEE Sensors Journal*. 2014. V. 14. N 11. P. 4059–4068. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2332296>
6. Netes V. Modern network technologies and dependability // *Proc. of the 3rd International Scientific and Technical Conference Modern Computer Network Technologies (MoNeTeC)*. 2020. P. 104–113. <https://doi.org/10.1109/monetec49726.2020.9258328>
7. Chun J., Song J., Paulino G. System-reliability-based design and topology optimization of structures under constraints on first-passage probability // *Structural Safety*. 2019. V. 76. P. 81–94. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2018.06.006>
8. Rhim H., Tamine K., Abassi R., Sauveron D., Guemara S. A multi-hop graph-based approach for an energy-efficient routing protocol in wireless sensor networks // *Human-centric Computing and Information Sciences*. 2018. V. 8. P. 30. <https://doi.org/10.1186/s13673-018-0153-6>
9. Астахова Т.Н., Колбанёв М.О., Лямин А.С., Маслов Н.С., Маслова Д.А. Энергоэффективный алгоритм выбора маршрута передачи данных в беспроводных сенсорных сетях высокой плотности. Труды учебных заведений связи. 2024. Т. 10. № 4. С. 100–109. <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-4-100-109>
10. Татарникова Т.М., Бимбетов Ф., Горина Е.В. Дополнение к алгоритму кластеризации беспроводной сенсорной сети // Программные продукты и системы. 2022. № 2. С. 222–228. <https://doi.org/10.15827/0236-235X.138.222-228>
11. Sadek R.A., Abd-alazeem D.M., Abbassy M.M. A new energy-efficient multi-hop routing protocol for heterogeneous wireless sensor networks // *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2021. V. 12. N 11. P. 481–491.
12. Татарникова Т.М., Бимбетов Ф., Горина Е.В. Алгоритм энергоэффективного взаимодействия узлов беспроводной сенсорной сети // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22. № 2. С. 294–301. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-2-294-301>
13. Величко В.В., Попков Г.В., Попков В.К. Модели и методы повышения живучести современных систем связи. М.: Горячая линия–Телеком, 2014. 270 с.
14. Нетес В.А. Основы теории надежности. М.: Горячая линия–Телеком, 2024. 102 с.
15. Шувалов В.П., Егунов М.М., Минина Е.А. Обеспечение показателей надежности телекоммуникационных систем и сетей. М.: Горячая линия – Телеком, 2016. 168 с.
16. Bogatyrev V.A. Protocols for dynamic distribution of requests through a bus with variable logic ring for reception authority transfer // *Automatic Control and Computer Sciences*. 1999. V. 33. N 1. P. 57–63.
17. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V., Bogatyrev S.V. Multipath transmission of heterogeneous traffic in acceptable delays with packet replication and destruction of expired replicas in the nodes that make up the path // *Communications in Computer and Information Science*. 2023. V. 1748. P. 104–121. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30648-8_9
18. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Control of multipath transmissions in the nodes of switching segments of reserved paths // *Proc. of the 6th International Scientific Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT)*. 2022. P. 1–5. <https://doi.org/10.1109/icct56057.2022.9976839>
19. Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V., Bogatyrev V.A. Priority Maintenance with Replication of Wait-Critical Requests // *Proc. of the Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*. 2021. P. 9470640. <https://doi.org/10.1109/weconf51603.2021.9470640>
20. Bogatyrev A.V., Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V. The probability of timely fully connected exchange in redundant real-time communication system // *Proc. of the Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*. 2020. P. 9131517. <https://doi.org/10.1109/weconf48837.2020.9131517>
21. Bogatyrev V.A., Le A.T., Abramova E.A. Structural reliability of a multipath routing network with reconfigurations when switching routes // *Proc. of the International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*. 2022. P. 414–418. <https://doi.org/10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896286>
22. Bogatyrev V.A., Le A.T., Abramova E.A. Reliability of multipath networks with optimization of the location of inter-path communication nodes // *Proc. of the International Russian Smart*
5. Zonouz A.E., Xing L., Vokkarane V.M., Sun Y.L. Reliability-oriented single-path routing protocols in wireless sensor networks. *IEEE Sensors Journal*, 2014, vol. 14, no. 11, pp. 4059–4068. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2332296>
6. Netes V. Modern network technologies and dependability. *Proc. of the 3rd International Scientific and Technical Conference Modern Computer Network Technologies (MoNeTeC)*, 2020, pp. 104–113. <https://doi.org/10.1109/monetec49726.2020.9258328>
7. Chun J., Song J., Paulino G. System-reliability-based design and topology optimization of structures under constraints on first-passage probability. *Structural Safety*, 2019, vol. 76, pp. 81–94. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2018.06.006>
8. Rhim H., Tamine K., Abassi R., Sauveron D., Guemara S. A multi-hop graph-based approach for an energy-efficient routing protocol in wireless sensor networks. *Human-centric Computing and Information Sciences*, 2018, vol. 8, pp. 30. <https://doi.org/10.1186/s13673-018-0153-6>
9. Astakhova T.N., Kolbanev M.O., Lyamin A.S., Maslov N.S., Maslova D.A. Energy-efficient algorithm for data path selection in high-density wireless sensor networks. *Proceedings of Telecommunication Universities*, 2024, vol. 10, no. 4, pp. 100–109. (in Russian) <https://doi.org/10.31854/1813-324X-2024-10-4-100-109>
10. Tarnikova T.M., Bimbetov F., Gorina E.V. An addition to the clustering algorithm of a wireless sensor network. *Software and Systems*, 2022, no. 2, pp. 222–228. (in Russian). <https://doi.org/10.15827/0236-235X.138.222-228>
11. Sadek R.A., Abd-alazeem D.M., Abbassy M.M. A new energy-efficient multi-hop routing protocol for heterogeneous wireless sensor networks. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2021, vol. 12, no. 11, pp. 481–491.
12. Tarnikova T.M., Bimbetov F., Gorina E.V. Algorithm for energy-efficient interaction of wireless sensor network nodes. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 2, pp. 294–301. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-2-294-301>
13. Velichko V.V., Popkov G.V., Popkov V.K. *Models and Methods of Increasing the Survivability of Modern Communication Systems*. Moscow: Hotline–Telecom Publ., 2014, 270 p. (in Russian)
14. Netes V.A. *Fundamentals of Reliability Theory*. Moscow: Hotline–Telecom Publ., 2024, 102 p. (in Russian)
15. Shuvalov V.P., Egunov M.M., Minina E.A. *Ensuring Reliability Indicators of Telecommunication Systems and Networks*. Moscow: Hotline–Telecom Publ., 2016, 167 p. (in Russian)
16. Bogatyrev V.A. Protocols for dynamic distribution of requests through a bus with variable logic ring for reception authority transfer. *Automatic Control and Computer Sciences*, 1999, vol. 33, no. 1, pp. 57–63.
17. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V., Bogatyrev S.V. Multipath transmission of heterogeneous traffic in acceptable delays with packet replication and destruction of expired replicas in the nodes that make up the path. *Communications in Computer and Information Science*, 2023, vol. 1748, pp. 104–121. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30648-8_9
18. Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Bogatyrev A.V. Control of multipath transmissions in the nodes of switching segments of reserved paths. *Proc. of the 6th International Scientific Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT)*, 2022, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/icct56057.2022.9976839>
19. Bogatyrev A.V., Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V. The probability of timely fully connected exchange in redundant real-time communication system. *Proc. of the Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, 2020, pp. 9131517. <https://doi.org/10.1109/weconf48837.2020.9131517>
20. Bogatyrev A.V., Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V. The probability of timely fully connected exchange in redundant real-time communication system. *Proc. of the Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, 2020, pp. 9131517. <https://doi.org/10.1109/weconf48837.2020.9131517>
21. Bogatyrev V.A., Le A.T., Abramova E.A. Structural reliability of a multipath routing network with reconfigurations when switching routes. *Proc. of the International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, 2022, pp. 414–418. <https://doi.org/10.1109/RusAutoCon54946.2022.9896286>
22. Bogatyrev V.A., Le A.T., Abramova E.A. Reliability of multipath networks with optimization of the location of inter-path

- Industry Conference (SmartIndustryCon). 2023. P. 449–453. <https://doi.org/10.1109/smartindustrycon57312.2023.10110818>
23. Хабаров С.П. Основы моделирования беспроводных сетей в среде OMNeT++. СПб: Лань, 2021. 260 с.

- communication nodes. *Proc. of the International Russian Smart Industry Conference (SmartIndustryCon)*, 2023, pp. 449–453. <https://doi.org/10.1109/smartindustrycon57312.2023.10110818>
23. Khabarov S.P. *Fundamentals of Modeling Wireless Networks in the OMNeT++ Environment*. St. Petersburg: Lan Publishing House, 2021, 260 p. (in Russian)

Авторы

Абрамова Евгения Александровна — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57221663902](https://orcid.org/0000-0002-5637-7427), <https://orcid.org/0000-0002-5637-7427>, Vectra4444@mail.ru

Богатырев Владимир Анатольевич — доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация; профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 7006571069](https://orcid.org/0000-0003-0213-0223), <https://orcid.org/0000-0003-0213-0223>, vladimir.bogatyrev@gmail.com

Статья поступила в редакцию 17.05.2025
Одобрена после рецензирования 20.06.2025
Принята к печати 25.07.2025

Authors

Evgeniya A. Abramova — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57221663902](https://orcid.org/0000-0002-5637-7427), <https://orcid.org/0000-0002-5637-7427>, Vectra4444@mail.ru

Vladimir A. Bogatyrev — D.Sc., Professor, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation (SUAI), Saint Petersburg, 190000, Russian Federation; Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 7006571069](https://orcid.org/0000-0003-0213-0223), <https://orcid.org/0000-0003-0213-0223>, vladimir.bogatyrev@gmail.com

Received 17.05.2025
Approved after reviewing 20.06.2025
Accepted 25.07.2025



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»