

Оценка средних задержек многопутевой беспроводной сети с перераспределением трафика

Е. А. Абрамова, В. А. Богатырев, С. В. Богатырев, В. К. Лыонг, М. Доре

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

Аннотация. Цель – исследование возможностей снижения средней задержки в многопутевой беспроводной сети. Минимизация задержек достигается путём адаптивного перераспределения трафика в узлах, выступающих в роли переключателей между альтернативными каналами доставки данных к целевому получателю. Для проведения экспериментов разработана имитационная модель в среде OMNeT++ с использованием фреймворка INET. Представлена имитационная модель многопутевой сети с возможностью сегментирования маршрутов при помощи перенаправления данных в узлах-переключателях, учитывающая влияние физических препятствий на средние задержки в сети. Определена зависимость средней сквозной задержки от доли трафика, перенаправляемого через каждый из маршрутов, а также от расположения физических препятствий в сети. Показано существование оптимального распределения трафика для различных конфигураций сети с учетом вариативного расположения препятствий распространения сигналов.

Ключевые слова: многопутевая сеть, средние задержки, имитационная модель, реконфигурация, маршрутизация, трафик.

Для цитирования: Абрамова Е. А., Богатырев В. А., Богатырев С. В., Лыонг В. К., Доре М. Оценка средних задержек многопутевой беспроводной сети с перераспределением трафика // Вестник СибГУТИ. 2026. Т. 20, № 3. С. 16–31
<https://doi.org/10.55648/1998-6920-2026-3-20-16-31>.



Контент доступен под лицензией

Creative Commons Attribution 4.0 License

© Е. А. Абрамова, В. А. Богатырев, С. В. Богатырев, В. К. Лыонг, М. Доре, 2026

Статья поступила в редакцию 24.06.2026;
переработанный вариант – 29.07.2026;
принята к публикации 05.08.2026.

1. Введение

Современные беспроводные сети все чаще используются в условиях высокой плотности трафика, ограниченного спектра частот и наличия физических препятствий, ухудшающих распространение сигнала, особенно в системах с несколькими маршрутами передачи данных, где высокая нагрузка и препятствия на пути сигнала могут существенно снижать эффективность коммуникации [1–3].

В условиях описанных ограничений особую актуальность приобретает разработка моделей и методов, направленных на повышение надежности, отказоустойчивости и снижения задержек передачи данных [4–10], в том числе на основе перераспределения трафика [11–13].

Одним из важных показателей, определяющих качество функционирования таких сетей, является средняя задержка доставки пакетов, которая влияет на устойчивость соединений и общую пропускную способность сети [4–6].

Вопросы управления трафиком и оценки задержек в вычислительных системах отражены в большом количестве публикаций. Так, автор работы [14] выдвигает структурное решение, опирающееся на математический аппарат теории очередей и комбинаторику, для оценки сквозных задержек в многоадресных сетях TSCH с произвольной топологией, трафиком и условиями соединения. Фреймворк проверен в ходе моделирования с использованием библиотеки OMNeT++ и предоставляет быстрый и надежный инструмент оценки задержки для поддержки принятия решений. В статье [15] представлена модель многопутевой маршрутизации, которая обеспечивает экономически эффективное планирование, низкую задержку и высокую надежность промышленных беспроводных ячеистых сетей, таких как сети WirelessHART. Модель разработана на основе алгоритма оптимального планирования и развертывания сети и включает три основных пути, каждый из которых имеет резервный узел. Резервный узел хранит данные, переданные родительским узлом, для обеспечения непрерывности связи при выходе из строя основных узлов. Моделирование проводилось в симуляторе WirelessHART с использованием Network Simulator (NS2).

В работе [16] предложена модель проводной телекоммуникационной сети с двумя маршрутами и возможностью адаптивного перенаправления пакетов в узле-переключателе, соединяющем сегменты маршрутов. На основе аналитических расчётов оценено влияние параметров распределения трафика, а также расположения узлов переключения на среднюю задержку доставки пакетов. Результаты показывают, что правильное размещение узлов ветвления и управление потоком позволяют существенно сократить задержки и повысить эффективность использования сетевых ресурсов. Авторы также отмечают, что данная методика может быть масштабирована для более сложных сетей, включая беспроводные, однако остаётся преимущественно теоретической, без валидации в реальных условиях. В работе [11] на основе имитационного моделирования проведено исследование влияния размещения препятствий и меняющихся условий распространения сигналов из-за изменений погоды на надежность связи. Однако влияние на задержки перераспределения трафика при этом не проводилось.

Адаптивное перераспределение трафика в узлах реконфигурации позволяет изменять маршрут доставки в зависимости от текущей нагрузки и состояния сети [17; 18]. Для оценки эффективности таких механизмов требуется реалистичная модель сети с возможностью управлять маршрутами и генерировать фоновую нагрузку, близкую к реальным условиям эксплуатации. Среда имитационного моделирования OMNeT++, применяемая в научных и инженерных исследованиях вычислительных систем, позволяет строить детализированные модели сетевой инфраструктуры с учётом уровня приложений, транспортного и сетевого взаимодействия, а также интеграции пользовательских протоколов и сценариев поведения узлов [19]. В сочетании с фреймворком INET, платформа предоставляет расширенные возможности по конфигурации маршрутизируемых потоков, организации фонового трафика, моделированию задержек, коллизий, потерь пакетов и других параметров, характерных для реальных условий беспроводной передачи. Гибкость архитектуры OMNeT++ делает возможным создание собственных сценариев переключения маршрутов, имитацию перегрузок и оценку поведения сети при изменении параметров среды, включая физические препятствия и ограниченный радиочастотный спектр. Всё это делает OMNeT++ эффективным инструментом для исследования адаптивных меха-

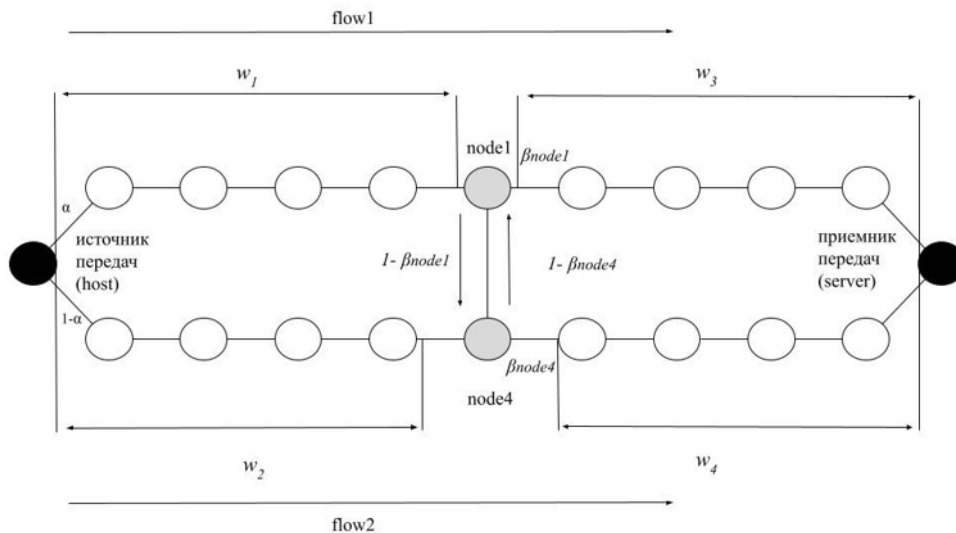


Рис. 1: Многопутевая сеть с узлами переключения (перераспределения) маршрутов

```
<config>
  <interface hosts="server" names="wlan[0]" address="10.0.0.10" netmask="255.255.255.0"/>
  <interface hosts="server" names="wlan[1]" address="10.0.0.20" netmask="255.255.255.0"/>
</config>
```

Рис. 2: Конфигурация сервера

низмов маршрутизации и анализа их влияния на показатели качества обслуживания в различных топологиях.

Целью статьи является изучение возможностей снижения средних задержек в многопутевой беспроводной сети с реконфигурируемыми маршрутами. В рамках исследования построена модель в среде OMNeT++, в которой реализовано переключение потоков данных между двумя маршрутами передачи, а также учтено влияние препятствий, имитирующих сложные условия распространения сигнала.

2. Имитационная модель

Рассмотрим многопутевую беспроводную сеть, в которой от хоста (источника запросов) к серверу (получателю) данные могут передаваться по двум маршрутам. Эти маршруты пересекаются: в узле node1 на верхнем пути и node4 на нижнем (рис.1). Хост генерирует потоки flow1 и flow2, которые направлены к одному серверу.

Рассмотрим организацию передач двух потоков (flow1 и flow2). Поток flow1 передается по первому маршруту. В узле node1 возможно одно из двух действий: перенаправление потока на второй путь, либо продолжение движения по первому маршруту к серверу. Поток flow2 передается по второму пути и может быть переключен на первый, для этого предназначен узел node4. Генерация двух независимых потоков от одного хоста к одному серверу реализована за счёт серверной модели с двумя логическими IP-адресами (рис. 2 иллюстрирует данное решение).

Потоки flow1 и flow2 отличаются целевыми IP-адресами и портами. Разные IP-адреса дают возможность независимо выбирать маршрут на сетевом уровне. Разные порты обес-

```

*.host*.numApps = 2

*.host*.app[0].typename = "UdpBasicApp"
*.host*.app[0].destAddresses = "10.0.0.10"
*.host*.app[0].destPort = 1001
*.host*.app[0].messageLength = 100byte
*.host*.app[0].sendInterval = 1s
*.host*.app[0].packetName = "flow1"

*.host*.app[1].typename = "UdpBasicApp"
*.host*.app[1].destAddresses = "10.0.0.20"
*.host*.app[1].destPort = 1000
*.host*.app[1].messageLength = 100byte
*.host*.app[1].sendInterval = 1s
*.host*.app[1].packetName = "flow2"

```

Рис. 3: Структура и параметры источника

```

*.node*.numUdpApps = 1
*.node*.udpApp[0].typename = "UdpBasicApp"
*.node*.udpApp[0].destAddresses = "server"
*.node*.udpApp[0].messageLength = 100B
*.node*.udpApp[0].sendInterval = 1s
*.node*.udpApp[0].startTime = uniform(0s, 0.5s)

```

Рис. 4: Структура блока генерации фоновой нагрузки

печивают корректное разделение потоков на транспортном уровне и в постобработке результатов моделирования. Полная конфигурация источника с двумя приложениями представлена на рис. 3. Источник каждую секунду отправляет сообщения длиной 100 байт по двум разным адресам, в результате чего генерируется два потока данных.

С целью приближения динамики маршрутизации к реальным сетевым условиям в узлах генерируется фоновый трафик. Функции узлов не ограничиваются пересылкой запросов, каждый из них также формирует UDP-сообщения с периодом в 1 секунду. Таким способом создается искусственная загрузка маршрутов, повышающая реалистичность моделирования распределённой сети. Описание вводимой на узлы фоновой нагрузки представлено в виде блока на рис. 4.

В качестве протокола маршрутизации рассмотрен протокол AOMDV (Ad hoc On-demand Multipath Distance Vector), однако модель не жестко связана с конкретной реализацией протокола. Благодаря модульной архитектуре среды OMNeT++ и гибкости используемых параметров, возможно применение и других протоколов маршрутизации [20], поддерживающих многопутевые сценарии, включая как реактивные, так и проактивные подходы.

Сквозная задержка (end-to-end delay) – от отправки источником до доставки адресату определяется как

$$EndToEndDelay = t_{transmission} + t_{propagation} + t_{processing} + t_{queuing} \quad (1)$$

где $t_{transmission}$ – задержка выдачи пакета из передатчика, $t_{propagation}$ – время прохождения сигналов по каналам связи (зависит от дистанции и помех и условий распространения),

$t_{processing}$ – задержки в маршрутизаторах, $t_{queuing}$ – задержки в очередях коммутационных узлов.

Для оценки сквозной задержки проведены имитационные эксперименты с учётом вариантов влияния физических препятствий и вариантов распределения трафика.

Для каждого узла, осуществляющего реконфигурацию с перераспределением трафика, вводится коэффициент распределения β . Он отражает долю запросов, переадресованных на другой маршрут. Для узла node1 этот коэффициент β_{node1} вычисляется как отношение числа перенаправленных заявок к суммарному количеству заявок, прошедших через узел-переключатель node1. Для node4 используется аналогичная формула, но для общего числа заявок через узел node4.

Доли запросов, распределяемых источником по двум рассматриваемым маршрутам, характеризуется коэффициентов α . Значение α варьируется от 0 до 1 и определяет долю трафика, направляемого по первому маршруту: при $\alpha = 0$ весь поток передаётся по второму пути, а при $\alpha = 1$ по первому.

Доля потоков на каждом маршруте задаётся вручную параметром *SendInterval* и обратно пропорциональна ему. Если для flow1 $SendInterval1 = 0,5$ с, а для flow2 $SendInterval2 = 1$ с, тогда α вычисляется как:

$$\alpha = \frac{1/SendInterval1}{1/SendInterval1 + 1/SendInterval2} \quad (2)$$

Описанная выше логика определяет принцип настройки модели: выбор параметров должен обеспечивать дискретный ряд значений коэффициента α в пределах от 0 до 1 с шагом 0,1.

Таблица 1. Диапазон значений *SendInterval* в зависимости от α

α	<i>SendInterval1</i> (путь 1), с	<i>SendInterval2</i> (путь 2), с
0,1	9,0	1,0
0,2	4,0	1,0
0,3	2,3333	1,0
0,4	1,5	1,0
0,5	1,0	1,0
0,6	0,6667	1,0
0,7	0,4286	1,0
0,8	0,25	1,0
0,9	0,1111	1,0
1,0	99999	1,0

Если $\alpha = 1$, интервал отправки должен быть выбран достаточно большим, чтобы обеспечить практически нулевой поток.

Общая средняя задержка пакетов в системе определяется следующим выражением:

$$w_{общ} = \alpha w_1 + (1 - \alpha)w_2 + (1 - \beta_{node1})w_3 + w_4\beta_{node1} + (1 - \beta_{node4})w_3 + w_4\beta_{node4} \quad (3)$$

В представленной формуле w_1 и w_2 — средние задержки до переключателя (для первого и второго маршрутов соответственно), w_3 и w_4 — средние задержки после переключателя (также для первого и второго маршрутов).

Module	Name	Mean	StdDev
network3.server.app[0]	endToEndDelay:vec...	0.19010786155643...	0.32669327291230...
network3.node1.app[0]	endToEndDelay:vec...	0.2256931165999394	0.675965870701198
network3.node4.app[1]	endToEndDelay:vec...	0.4614526005197755	0.5025495104971268
network3.server.app[1]	endToEndDelay:vec...	0.19010786155643...	0.32669327291230...

Рис. 5: Результаты моделирования

```

<environment>
  <!-- Rotated cuboids represented as prisms -->
  <object position="center 100 100 0" orientation="0 0 0" shape="prism 100 100 150 200 150 200 50 100 50"
    material="concrete" line-color="0 0 0" fill-color="112 128 144"/>
  <object position="center 250 100 0" orientation="30 0 0" shape="prism 100 100 150 200 150 200 50 100 50"
    material="concrete" line-color="0 0 0" fill-color="112 128 144"/>
  <object position="center 400 100 0" orientation="45 0 0" shape="prism 100 100 150 200 150 200 50 100 50"
    material="concrete" line-color="0 0 0" fill-color="112 128 144"/>
  <object position="center 550 100 0" orientation="60 0 0" shape="prism 100 100 150 200 150 200 50 100 50"
    material="concrete" line-color="0 0 0" fill-color="112 128 144"/>
</environment>

```

Рис. 6: Задание параметров препятствий

Все эти значения получены экспериментально и могут быть воспроизведены при моделировании. На рис. 5 приведён образец выходных данных моделирования с конкретными значениями задержек.

В модели учитывается частичное размещение коммутационных узлов в условиях лесистой местности и городской застройки. Для задания подобных помех в OMNeT++ могут использоваться как встроенные модули, так и пользовательские описания препятствий с помощью внешних XML-файлов, как показано на рисунке 6. В таких файлах задаются пространственные параметры объекта — координаты, габариты, материал и визуальные свойства. На графическом уровне препятствия отображаются в виде простых геометрических тел. Несмотря на возможность моделировать каждое препятствие отдельно, такой подход может существенно повысить вычислительную нагрузку, особенно при масштабных сценариях. Более эффективным решением является задание усреднённых параметров среды, соответствующих типичным условиям распространения сигнала в заданной области — например, коэффициенты затухания для городской или лесной зоны.

При моделировании использована модель ослабления сигнала DielectricObstacleLoss библиотеки INET, которая отражает распространение электромагнитных волн в диэлектрических материалах и позволяет учитывать ряд факторов, возникающих при прохождении сигнала через препятствия [21; 22]. Модель учитывает частичное поглощение, отражение на границе материалов и снижение скорости распространения в различных препятствиях.

В модели используются параметры, позволяющие количественно оценить потери сигнала и его задержку. Тангенс угла потерь (dielectricLossTangent) показывает, насколько сильно материал поглощает сигнал. Скорость распространения волны внутри материала задаётся параметром propagationSpeed. На рис. 7 показан пример того, как конфигурируется препятствие с учётом этих параметров. При использовании DielectricObstacleLoss система отслеживает, пересекает ли прямой луч (line-of-sight) между передающим и приёмным устройствами какие-либо объекты. В случае пересечения учитываются геометрические и физические характеристики препятствия, такие как его толщина, путь сигнала

```

<environment>
  <object position="min 800 450 0" orientation="0 0 0" shape="cuboid 500 10 4"
    material="concrete" fill-color="203 65 84" opacity="0.8"/>
  <material name="concrete" dielectricLossTangent="0.02" propagationSpeed="2.0e8"/>
</environment>

```

Рис. 7: Настройка DielectricObstacleLoss для моделируемого объекта

внутри материала и параметры потерь. В результате рассчитывается уровень сигнала на выходе из препятствия L с учётом совокупного влияния этих факторов.

$$L = e^{-\alpha d}, \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{2\pi f}{c} \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon_r \cdot \tan \delta}{2}}, \quad (5)$$

где f – частота сигнала, c – скорость света, ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость, $\tan \delta$ – lossTangent.

Численные значения параметров dielectricLossTangent и propagationSpeed для моделируемых типов среды приведены в таблице 2.

Эти параметры отражают характерные свойства распространения радиосигнала в различных материалах и были выбраны на основе нормативных данных, рекомендованных Международным союзом электросвязи (ITU) в документе ITU-R P.1238-7, в части распространения радиоволн в диапазоне частот от 900 МГц до 100 ГГц. Стандарт содержит эмпирически подтверждённые характеристики затухания для широкого спектра строительных материалов, включая бетон, кирпич, древесину и стекло, а также соответствующие значения поглощения и изменения скорости сигнала в среде [23].

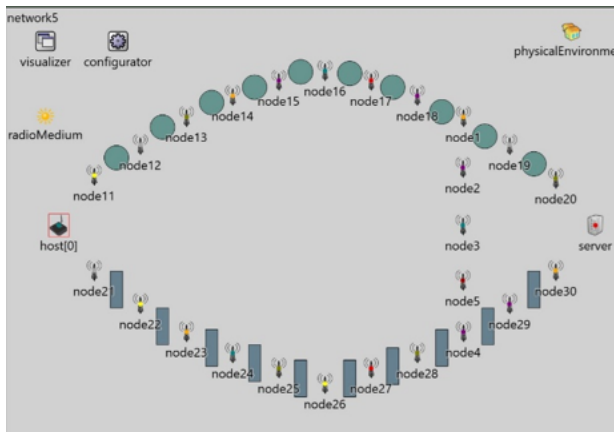
Таблица 2. Параметры для оценки потерь сигнала при прохождении через преграды

Тип препятствия	Значение dielectricLossTangent, дБ/м	Значение propagationSpeed, м/с
Влажный хвойный лес	0.6–1.0	2.2e8
Смешанный лес	0.4–0.6	2.5e8
Плотная городская застройка	0.5–1.2	2.5–2.9e8

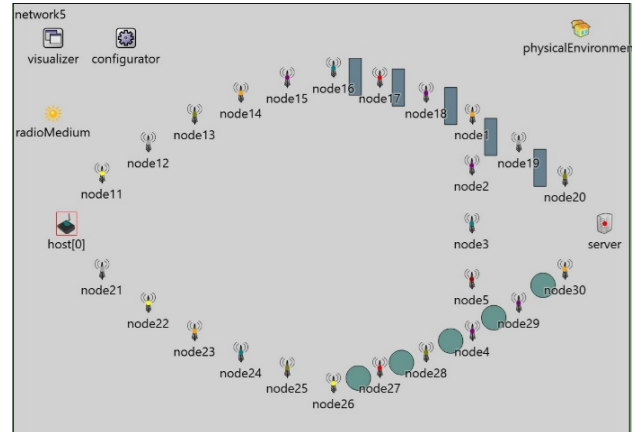
3. Эксперименты

Рассмотрим случай, когда верхние узлы маршрутизации находятся в хвойном лесу, нижние в зоне городской застройки. Переключающая линия между маршрутами расположена ближе к узлу-приёмнику. Схему сети с учетом расположения препятствий иллюстрирует рис. 8а. Каждый лесной сегмент между соседними узлами представляет собой область радиусом 35 м. Участки города, в свою очередь, имеют размеры 30×60×30 м. В сети рис. 8б, препятствия на вторых сегментах первого и второго пути смещены к принимающему узлу.

Определим зависимость средней задержки доставки пакетов от коэффициентов α и β . Коэффициент α отражает доли распределение запросов между маршрутами на стороне отправителя, коэффициент β - в узле-переключателе. Зависимость суммарной средней задержки от коэффициента β , отражающего доли распределения трафика для узлов node1 и node4 приведены на рис.9а и б соответственно) для сети по рис. 8а. Для узлов node1 и node4 сети по рис. 8б анализируемые зависимости приведены на рис. 9в и 9г. По графикам рис. 9 можно визуальнo определить, при каких пропорциях распределения потока β достигаются минимальные задержки.



(а)



(б)

Рис. 8: Вариант сети с учетом расположения препятствий – по всем путям (а); по вторым половинам путей (б)

Влияние коэффициента α на величину средних задержек для конфигурации сети на рис. 8а и 8б) проиллюстрировано на рис. 10.

Следующая рассматриваемая топология сети предполагает смещение узлов реконфигурации в сторону источника (рис. 11 (а)), здания размещены между узлами первой половины верхнего и нижнего пути. На рис.11 (б) здания размещены между узлами первой половины верхнего пути и второй половины нижнего пути.

Во всех исследуемых конфигурациях количество сетевых элементов одинаково, но различается пространственное распределение препятствий радиосигналу (физических объектов). Зависимости суммарной задержки от параметра β , характеризующего распределение трафика между маршрутами в реконфигурируемых узлах, показаны на рис.12.

Рис. 12а соответствует распределению в узле node1 для сети по рис. 11а, рис. 12б – распределению в узле node4. Для сети по рис. 11б распределению трафика в узле node1 соответствует рис. 12в, а в узле node4 – рис. 12г.

Рисунок 13 отражает влияние коэффициента α на величину общей задержки для конфигураций сети по рис. 11а и 11б.

В качестве работ по развитию данного направления предполагается построение имитационных моделей для многопутевых беспроводных сетей при неоднородности трафика по допустимым задержкам в сети с учетом влияния изменяющихся условий распространения сигналов [24; 25].

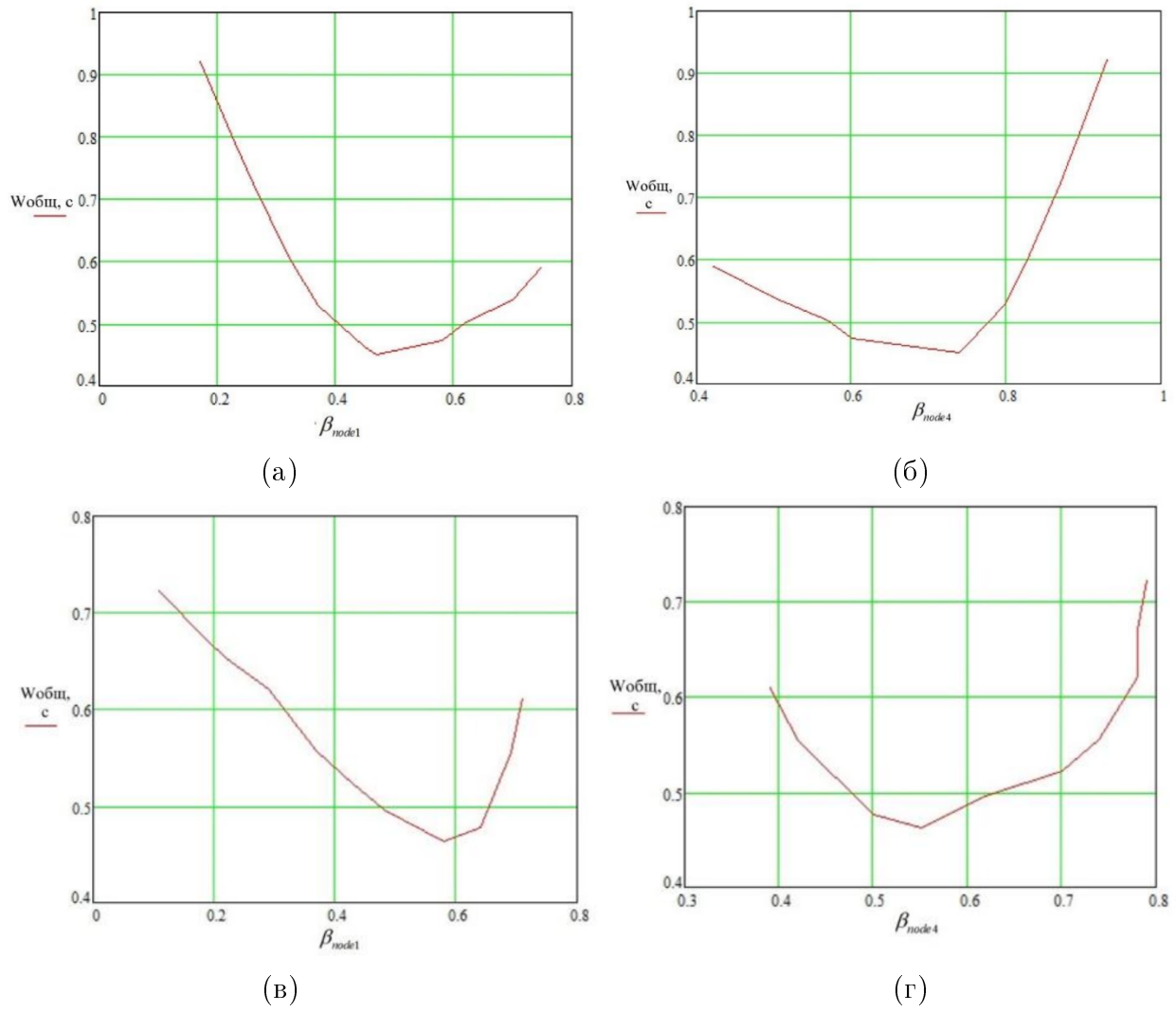


Рис. 9: Зависимость общей средней задержки от коэффициента β для узлов – node1 (а) и node4 (б) сети по рис. 8а. Для узлов – node1 (в) и node4 (г) сети по рис. 8б

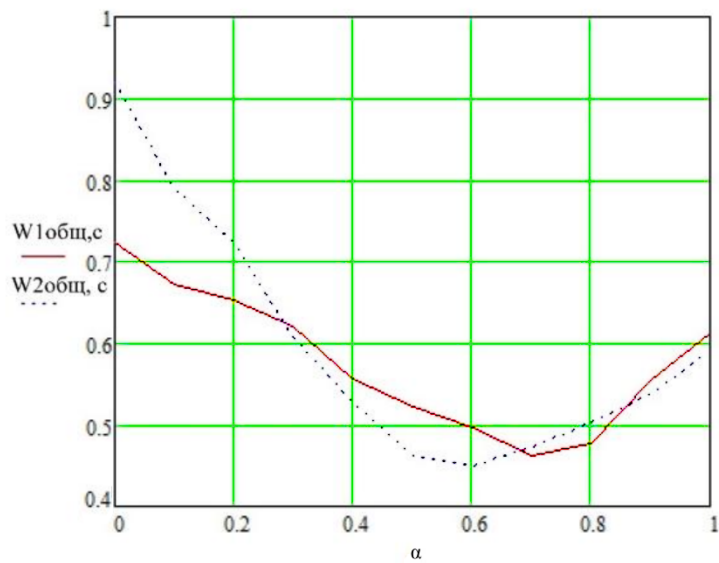


Рис. 10: Влияние коэффициента α на средние задержки для сети по рис. 8а и 8б

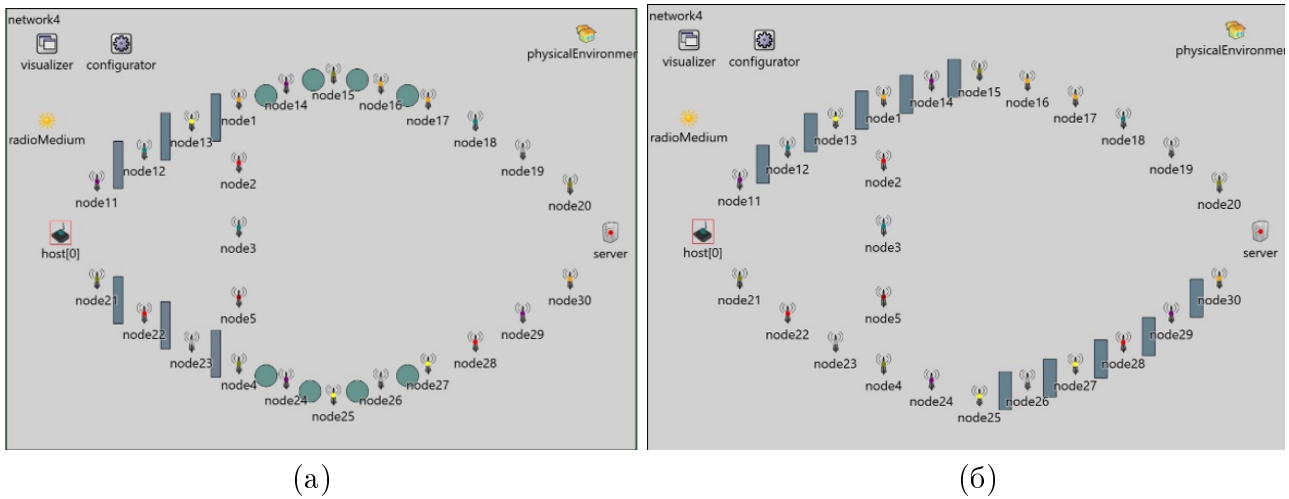
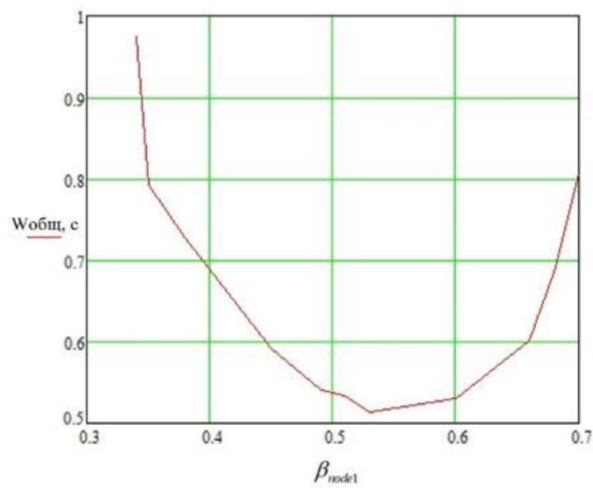
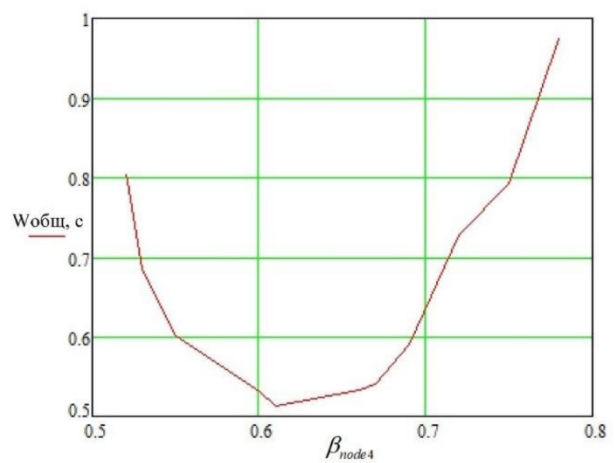


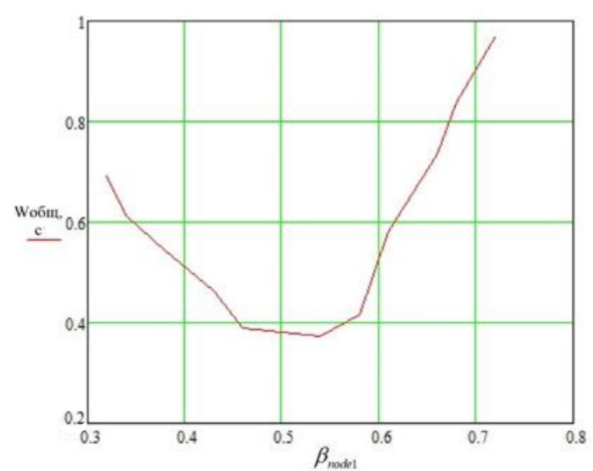
Рис. 11: Сеть с переключающими узлами, расположенными ближе к источнику



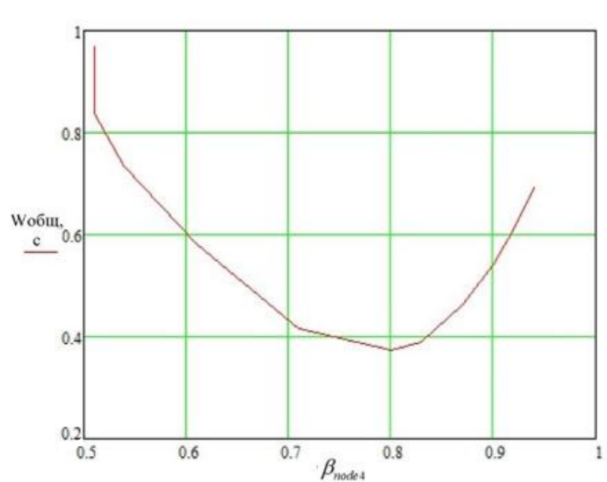
(а)



(б)



(в)



(г)

Рис. 12: Зависимости суммарной задержки от параметра распределения трафика между маршрутами β узлах, node1 – (а), node4 – (б), для рис. 11а и для рис. 11б в узлах node1 – (в) и node4 – (г)

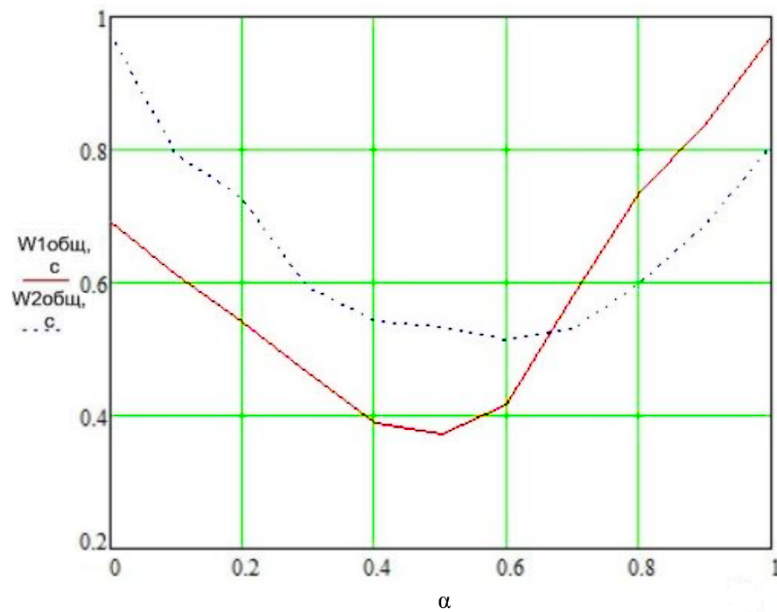


Рис. 13: Влияние коэффициента α на средние задержки для конфигураций по рис. 11а и 11б

4. Заключение

Предложена имитационная модель многопутевой беспроводной сети, учитывающая влияние перераспределения трафика в зависимости от топологий сети и особенности распространения сигналов при различном расположении препятствий. Для реализации алгоритма динамической оценки параметров α и β в реальных сетях узлы-переключатели с помощью дополнительного модуля могут собирать статистику поступающего трафика, измеряя количество байт за фиксированные интервалы времени.

Показано, что динамическая настройка маршрутизации под текущие условия среды и структуру сети становится ключевым фактором повышения эффективности функционирования распределённых беспроводных вычислительных систем.

Литература

1. An accuracy-aware energy-efficient multipath routing algorithm for WSNs / F. Dan [et al.] // *Sensors* (Basel). — 2024. — Vol. 24, no. 1. — P. 285. — DOI: 10.3390/s24010285.
2. Sharma P., Singh S., Thakur N. An efficient multipath routing in WSN using ANFIS: end-to-end delay and reliability analysis // *International Journal of Enhanced Research in Science, Technology & Engineering*. — 2023. — Vol. 12, no. 7. — P. 56–65.
3. Nardini G., Stea G., Viridis A. Distribution of multi-hop latency for probabilistic broadcasting // *Ad Hoc Networks*. — 2021. — P. 102754. — DOI: 10.1016/j.adhoc.2021.102754.
4. Zhou R., Li L., Zhang J. Analysis on event delay in event-driven wireless sensor networks // *Proceedings of the 2012 National Conference on Information Technology and Computer Science*. — Atlantis Press, 2012. — P. 656–660. — DOI: 10.2991/citcs.2012.250.

5. *Li X., Wang Y., Chen Z.* On delay performance study for cooperative multicast MANETs // *Ad Hoc Networks*. — 2018. — Vol. 75. — P. 1–12.
6. *Tatarnikova T. M., Arkhiptsev E. D.* Designing fault-tolerant systems with microservice architecture // *Proceedings of the 27th International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM)*. — 2024. — P. 348–351. — DOI: 10.1109/SCM62608.2024.10554143.
7. *Татарникова Т. М., Янковский Н. А.* Динамическое управление ресурсами в восходящем канале 5G // *Информация и космос*. — 2025. — № 4. — С. 38–44.
8. Энергоэффективный алгоритм выбора маршрута передачи данных в беспроводных сенсорных сетях высокой плотности / Т. Н. Астахова [и др.] // *Труды учебных заведений связи*. — 2024. — Т. 10, № 4. — С. 100–109.
9. *Burkov A. A., Rachugin R. O., Turlikov A. M.* Analyzing and stabilizing multichannel ALOHA with the use of the preamble-based exploration phase // *Information and Control Systems*. — 2022. — No. 5. — P. 49–59. — DOI: 10.31799/1684-8853-2022-5-49-59.
10. Многопутевая маршрутизация в сетях с ускоренной доставкой сообщений / Н. В. Колесов [и др.] // *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. — 2026. — Т. 26, № 1. — С. 207–213. — DOI: 10.17586/2226-1494-2026-26-1-207-213.
11. *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.
12. *Богатырев В. А., Богатырев С. В.* Надежность мультикластерных систем с перераспределением потоков запросов // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. — 2017. — Т. 60, № 2. — С. 171–177.
13. *Bogatyrev V. A., Bogatyrev S. V., Bogatyrev A. V.* Model and interaction efficiency of computer nodes based on transfer reservation at multipath routing // *Proceedings of 2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF 2019)*. — 2019. — P. 8840647.
14. *Shudrenko Y., Timm-Giel A.* Modeling end-to-end delays in TSCH wireless sensor networks using queuing theory and combinatorics // *Computing*. — 2024. — Vol. 106. — P. 2923–2947.
15. Reliable fault tolerant based multipath routing model for industrial WSN / H. Abdulrab [et al.] // *Applied Sciences*. — 2021. — Vol. 12, no. 2. — P. 544. — DOI: 10.3390/app12020544.
16. *Богатырев В. А., Ле А., Абрамова Е. А.* Перераспределение потоков сети с многопутевой маршрутизацией // *Автоматизация процессов управления*. — 2022. — № 4. — С. 141–149.
17. *Maimour M.* Interference-aware multipath routing for WSNs: overview and performance evaluation // *Applied Computing and Informatics*. — 2018. — Vol. 16, no. 1/2. — P. 59–80. — DOI: 10.1016/j.aci.2018.03.002.

18. *Awad F. H.* Optimization of relay node deployment for multi-source multipath routing in wireless multimedia sensor networks using Gaussian distribution // *Computer Networks*. — 2018. — Vol. 143. — P. 103–117. — DOI: 10.1016/j.comnet.2018.08.021.
19. *Shaik M., Kim S. W.* Security in wireless sensor networks using OMNeT++: literature review // *Sensors (Basel)*. — 2025. — Vol. 25, no. 10. — P. 2972. — DOI: 10.3390/s25102972.
20. Lifetime modelling of wireless sensor networks with multipath routing / K. Biswas [et al.] // *Proceedings of IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)*. — 2024. — P. 178–183. — DOI: 10.1109/PerComWorkshops59983.2024.10502447.
21. *Al-Ariki H. D. E., Swamy M. S.* A survey and analysis of multipath routing protocols in wireless multimedia sensor networks // *Wireless Networks*. — 2017. — Vol. 23. — P. 23–35.
22. *Maimour M., Bidai Z.* A multipath prefix routing for wireless sensor networks // *Wireless Personal Communications*. — 2016. — Vol. 91. — P. 31–43.
23. *Международный союз электросвязи.* Рекомендация ITU-R P.1238-7: Данные распространения и методы расчёта для проектирования внутренних радиосетей и беспроводных локальных сетей в диапазоне частот от 900 МГц до 100 ГГц : тех. отч. / ITU. — Женева, 2012. — URL: <https://itu.int>.
24. *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*. Vol. 1748. — Springer, 2023. — P. 104–121.
25. *Bogatyrev V. A., Bogatyrev A. V., Bogatyrev S. V.* Redundant multi-path service of a flow heterogeneous in delay criticality with defined node passage paths // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2021. — Vol. 1864, no. 1. — P. 012094.

Абрамова Евгения Александровна

аспирант университета ИТМО (197101, Россия, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д.49, литер А.). Тел. +7-965-790-00-90. e-mail: vectra4444@mail.ru. Scopus Author ID 57221663902, ORCID 0000-0002-5637-7427

Богатырев Владимир Анатольевич

д.т.н., профессор факультета программной инженерии и компьютерной техники, Университет ИТМО (197101, Россия, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д.49, литер А.), тел. +7-911-726-02-26. E-mail: vladimir.bogatyrev@gmail.com. Scopus Author ID 7006571069, ORCID 0000-0003-0213-0223.

Богатырев Станислав Владимирович

аспирант университета ИТМО (197101, Россия, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д. 49, литер А), тел. +7(911)937-74-66, e-mail: realloc@realloc.spb.ru, Scopus ID: 57183002200

Лыонг Ван Киен

аспирант университета ИТМО (197101, Россия, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д. 49, литер А), e-mail: luongkien1432000@gmail.com, ORCID 0009-0004-3010-2398

Доре Морикен

аспирант университета ИТМО (197101, Россия, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д. 49, литер А), e-mail: morykendore@gmail.com ORCID 0000-0003-0934-972X

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад соавторов: Авторы внесли равный вклад в постановку задачи, обработку и анализ данных, интерпретацию результатов и подготовку рукописи.

Estimation of average latency in a multipath wireless network with traffic redistribution

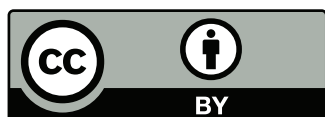
Evgenia A. Abramova, Vladimir A. Bogatyrev, Stanislav V. Bogatyrev, Van K. Lyong, Moriken Dore

ITMO University, Saint Petersburg

Abstract. The aim is to study the possibilities of reducing the average latency in a multipath wireless network. Delays are minimized by adaptive traffic redistribution in nodes that act as switches between alternative data delivery channels to the target recipient. To conduct the experiments, a simulation model has been developed in the OMNeT++ environment using the INET framework. A simulation model of a multipath network with the possibility of route segmentation by redirecting data in switch nodes is presented, taking into account the influence of physical obstacles on average network delays. The dependence of the average end-to-end delay on the proportion of traffic redirected through each of the routes, as well as on the location of physical obstacles in the network, is determined. The existence of an optimal traffic distribution for different network configurations is shown, taking into account the variable location of signal propagation obstacles.

Keywords: multipath network, average delays, simulation model, reconfiguration, routing, traffic.

For citation: Abramova E.A., Bogatyrev V.A., Bogatyrev S.V., Luong V.K., Dore M. Estimation of average delays of a multipath wireless network with traffic redistribution in reconfiguration nodes. // Vestnik SibGUTI, 2026, vol. 20, no. 3, pp. 16–31
<https://doi.org/10.55648/1998-6920-2026-3-20-16-31>.



Content is available under the license

Creative Commons Attribution 4.0 License

© Abramova E. A., Bogatyrev V. A., Bogatyrev S. V., Luong V. K.,
Dore M., 2026

The article was submitted: 24.06.2026;
revised version – 29.07.2026;
accepted for publication: 05.08.2026.

References

1. An accuracy-aware energy-efficient multipath routing algorithm for WSNs / F. Dan [et al.] // Sensors (Basel). — 2024. — Vol. 24, no. 1. — P. 285. — DOI: 10.3390/s24010285.
2. Sharma P., Singh S., Thakur N. An efficient multipath routing in WSN using ANFIS: end-to-end delay and reliability analysis // International Journal of Enhanced Research in Science, Technology & Engineering. — 2023. — Vol. 12, no. 7. — P. 56–65.
3. Nardini G., Stea G., Virdis A. Distribution of multi-hop latency for probabilistic broadcasting // Ad Hoc Networks. — 2021. — P. 102754. — DOI: 10.1016/j.adhoc.2021.102754.

4. *Zhou R., Li L., Zhang J.* Analysis on event delay in event-driven wireless sensor networks // Proceedings of the 2012 National Conference on Information Technology and Computer Science. — Atlantis Press, 2012. — P. 656–660. — DOI: 10.2991/citcs.2012.250.
5. *Li X., Wang Y., Chen Z.* On delay performance study for cooperative multicast MANETs // Ad Hoc Networks. — 2018. — Vol. 75. — P. 1–12.
6. *Tatarnikova T. M., Arkhiptsev E. D.* Designing fault-tolerant systems with microservice architecture // Proceedings of the 27th International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). — 2024. — P. 348–351. — DOI: 10.1109/SCM62608.2024.10554143.
7. *Tatarnikova T. M., Yankovsky N. A.* Dynamic resource management in the 5G uplink // Information and Space. — 2025. — No. 4. — P. 38–44.
8. Energy-efficient algorithm for choosing a data transmission route in high-density wireless sensor networks / T. N. Astakhova [et al.] // Proceedings of Educational Institutions of Communications. — 2024. — Vol. 10, no. 4. — P. 100–109.
9. *Burkov A. A., Rachugin R. O., Turlikov A. M.* Analyzing and stabilizing multichannel ALOHA with the use of the preamble-based exploration phase // Information and Control Systems. — 2022. — No. 5. — P. 49–59. — DOI: 10.31799/1684-8853-2022-5-49-59.
10. Multipath routing in networks with accelerated message delivery / N. V. Kolesov [et al.] // Scientific and Technical Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics. — 2026. — Vol. 26, no. 1. — P. 207–213. — DOI: 10.17586/2226-1494-2026-26-1-207-213.
11. *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 Bulletin of Information Technologies, Mechanics and Optics. — 2025. — Vol. 25, no. 4. — P. 762–770. — DOI: 10.17586/2226-1494-2025-25-4-762-770.
12. *Bogatyrev V. A., Bogatyrev S. V.* Reliability of multicluster systems with reallocation of query flows // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Instrument engineering. — 2017. — Vol. 60, no. 2. — P. 171–177.
13. *Bogatyrev V. A., Bogatyrev S. V., Bogatyrev A. V.* Model and interaction efficiency of computer nodes based on transfer reservation at multipath routing // Proceedings of 2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF 2019). — 2019. — P. 8840647.
14. *Shudrenko Y., Timm-Giel A.* Modeling end-to-end delays in TSCH wireless sensor networks using queuing theory and combinatorics // Computing. — 2024. — Vol. 106. — P. 2923–2947.
15. Reliable fault tolerant based multipath routing model for industrial WSN / H. Abdulrab [et al.] // Applied Sciences. — 2021. — Vol. 12, no. 2. — P. 544. — DOI: 10.3390/app12020544.
16. *Bogatyrev V. A., Le A., Abramova E. A.* Redistribution of network flows with multipath routing // Automation of Management Processes. — 2022. — No. 4. — P. 141–149.
17. *Maimour M.* Interference-aware multipath routing for WSNs: overview and performance evaluation // Applied Computing and Informatics. — 2018. — Vol. 16, no. 1/2. — P. 59–80. — DOI: 10.1016/j.aci.2018.03.002.
18. *Awad F. H.* Optimization of relay node deployment for multi-source multipath routing in wireless multimedia sensor networks using Gaussian distribution // Computer Networks. — 2018. — Vol. 143. — P. 103–117. — DOI: 10.1016/j.comnet.2018.08.021.
19. *Shaik M., Kim S. W.* Security in wireless sensor networks using OMNeT++: literature review // Sensors (Basel). — 2025. — Vol. 25, no. 10. — P. 2972. — DOI: 10.3390/s25102972.
20. Lifetime modelling of wireless sensor networks with multipath routing / K. Biswas [et al.] // Proceedings of IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops). — 2024. — P. 178–183. — DOI: 10.1109/PerComWorkshops59983.2024.10502447.
21. *Al-Ariki H. D. E., Swamy M. S.* A survey and analysis of multipath routing protocols in wireless multimedia sensor networks // Wireless Networks. — 2017. — Vol. 23. — P. 23–35.
22. *Maimour M., Bidai Z.* A multipath prefix routing for wireless sensor networks // Wireless Personal Communications. — 2016. — Vol. 91. — P. 31–43.

23. *International Telecommunication Union*. ITU-R Recommendation P. 1238-7: Propagation data and calculation methods for the design of internal radio networks and wireless local area networks in the frequency range from 900 MHz to 100 GHz : tech. rep. / ITU. — Geneva, 2012. — URL: <https://itu.int>.
24. *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*. Vol. 1748. — Springer, 2023. — P. 104–121.
25. *Bogatyrev V. A., Bogatyrev A. V., Bogatyrev S. V.* Redundant multi-path service of a flow heterogeneous in delay criticality with defined node passage paths // *Journal of Physics: Conference Series*. — 2021. — Vol. 1864, no. 1. — P. 012094.

Evgenia A. Abramova

PhD student, ITMO University (197101, Russia, St. Petersburg, Kronverksky av, 49, lit. A.), phone +7-965-790-00-90. e-mail: vecetra4444@mail.ru. Scopus Author ID 57221663902, ORCID 0000-0002-5637-7427

Vladimir A. Bogatyrev

Dr. Sc. in Engineering, Professor, ITMO University (197101, Russia, St. Petersburg, Kronverksky av, 49, lit. A.), e-mail: vladimir.bogatyrev@gmail.com, Scopus Author ID 7006571069, ORCID 0000-0003-0213-0223

Stanislav V. Bogatyrev

PhD student, ITMO University (197101, Russia, St. Petersburg, Kronverksky av, 49, lit. A.), phone +7-965-790-00-90. e-mail: vecetra4444@mail.ru. Scopus Author ID 57221663902, ORCID 0000-0002-5637-7427

Van K. Lyong

PhD student, ITMO University (197101, Russia, St. Petersburg, Kronverksky av, 49, lit. A.), e-mail: luongkien1432000@gmail.com, ORCID 0009-0004-3010-2398

Moriken Dore

PhD student, ITMO University (197101, Russia, St. Petersburg, Kronverksky av, 49, lit. A.), e-mail: morykendore@gmail.com ORCID 0000-0003-0934-972X