

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

На правах рукописи



Матвеева Анна Павловна

**МОДЕЛИ И АЛГОРИТМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДОСТУПНОСТИ  
В КОРПОРАТИВНОЙ ПРОГРАММНО-ОПРЕДЕЛЯЕМОЙ  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ**

Специальность: 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Владимир 2022

Работа выполнена на кафедре «Информатика и защита информации» в ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ)

Научный руководитель: **Монахов Михаил Юрьевич**  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информатики и защиты информации ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Владимир.

Официальные оппоненты: **Костров Борис Васильевич**  
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электронных вычислительных машин ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина» (РГРТУ), г. Рязань.

**Малёшина Людмила Михайловна**  
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Информационные технологии в юридической деятельности и документационное обеспечение управления» ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта» (МИИТ), г. Москва.

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет», г. Омск.

Защита диссертации состоится 05 октября 2022 года в 14:00 часов в ауд. 301-3 на заседании диссертационного совета 24.2.281.01 при Владимирском государственном университете имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, корп. 3, ВлГУ, РТиРС.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» и на сайте <http://diss.vlsu.ru>.

Автореферат разослан «20» июля 2022 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 600000, г. Владимир, ул. Горького, 87, ВлГУ, РТиРС, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.281.01

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор технических наук, профессор



А. Г. Самойлов

**Актуальность темы.** Одной из важнейших характеристик функционирования и предоставления услуг в рамках телекоммуникационной сети является доступность, так как никакая другая характеристика сети не будет иметь значения в условиях невозможности обеспечения своевременного доступа к ресурсам сети. Особенно это актуально для корпоративных сетей, где невозможность выполнения сетевых задач за директивное время может оказать негативное влияние на прибыль организации. Традиционные сети уже не в состоянии обеспечить данную характеристику должным образом в силу ряда причин, как то: рост трафика, приводящий к перегрузкам, устаревание протоколов, конфликты оборудования разных вендоров, сложности конфигурирования и др. В качестве решения ряда проблем, стоящих в настоящее время перед телекоммуникационными сетями, рассматривают переход к архитектуре программно-определяемых сетей (SDN), которая позволяет перевести сетевые элементы под контроль настраиваемого программного обеспечения. SDN дает возможность изменять и вносить желаемую функциональность в логику работы сети. Однако, возможности, предоставляемые SDN по перестройке топологии, используются в настоящий момент не до конца.

При этом, современные корпоративные телекоммуникационные сети (КТС) характеризуются использованием все большего числа сетевых сервисов. Фундаментальной проблемой здесь становится повышение качества обслуживания в новых условиях, которые продиктованы нуждами прикладного уровня. Критичной характеристикой многих важных для функционирования КТС сетевых сервисов является время отклика, однако современные протоколы не в состоянии обеспечить данную характеристику, поскольку не содержат данного критерия. Поэтому для того, чтобы прикладной уровень эффективно использовал сетевую инфраструктуру, требуется внедрять дополнительные критерии качества, такие как доступность.

Таким образом, актуальность исследования доступности программно-определяемых сетей обуславливается необходимостью учета данного критерия для обеспечения эффективного функционирования корпоративной сети при построении с нуля или переходе с уже существующей топологии.

Степень разработанности темы. Вопросам организации, управления и масштабируемости SDN посвящены работы ведущих российских и зарубежных уче-

ных Парамонова А.И., Перепелкина Д.А., Бурдонова И.Б., Ушакова Ю.А., Егорова В.Б., Захарова А.А., Bhandarkar S., Hu J., Oliveira A.T., Mondal A., Tuncer D. Проблема обеспечения качества обслуживания в телекоммуникационных сетях исследовалась в трудах таких ученых, как Парамонов А.И., Абросимов Л.А., Перепелкин Д.А., Гончаров А.А., Султанов Т.Г., Богданова Н.В., Devera M., Balan D., Domanska J., Stanwood K. L., Keith S., C. Douligeris, Vegesna S., Ma Q.

**Объект исследования** – корпоративные программно-определяемые телекоммуникационные сети (КПТС).

**Предметом исследования** являются методы обеспечения качества обслуживания трафика на основе доступности узлов и каналов связи

**Цель работы** состоит в повышении эффективности обслуживания трафика корпоративных программно-определяемых телекоммуникационных сетей.

В связи с поставленной целью решались следующие **задачи** исследования:

1. Проанализировать существующие решения задачи повышения доступности корпоративной программно-определяемой телекоммуникационной сети и ее компонентов и методик ее оценки.

2. Разработать алгоритм оптимизации топологии программно-определяемой телекоммуникационной сети по критерию максимума интегрального показателя доступности.

3. Разработать алгоритм планирования очередей передачи данных в программно-определяемой телекоммуникационной сети, позволяющий оптимизировать использование пропускной способности и обеспечивать максимальную доступность поддерживаемых сервисов.

4. Разработать инструментальные средства для оценки адекватности полученных решений.

**Научная новизна** проведенных исследований и полученных в работе результатов заключается в следующем:

1. Разработан алгоритм оптимизации топологии программно-определяемой телекоммуникационной сети, позволяющий подстраивать топологию программно-определяемой телекоммуникационной сети под изменяющиеся внешние условия и решаемую задачу.

2. Разработан алгоритм планирования очередей передачи данных, позволяющий обеспечивать минимальную задержку для приоритетных классов поддерживаемых сервисов, оптимизируя использование пропускной способности.

3. Разработан алгоритм поддержки низкоприоритетных сервисов в условиях сильного доминирования высокоприоритетных сервисов, обеспечивающий принцип справедливости в отношении всех сервисов.

**На защиту выносятся:**

1. Алгоритм оптимизации топологии программно-определяемой телекоммуникационной сети, повышающий интегральный показатель доступности.

2. Алгоритм планирования очередей передачи данных, обеспечивающий минимальную задержку для приоритетных классов поддерживаемых сервисов.

3. Алгоритм поддержки низкоприоритетных сервисов, позволяющий обеспечить принцип справедливости в отношении всех сервисов, работающих в программно-определяемой телекоммуникационной сети.

**Практическая значимость работы.** Создан программно-аппаратный стенд в среде Mininet для проведения экспериментов, позволяющий формировать произвольные топологии программно-определяемых сетей, осуществлять маршрутизацию потоков трафика на базе контроллера ONOS, а также производить расчет показателей доступности. Эксперименты позволили выявить существенные факторы воздействия на топологию в программно-определяемых сетях с высокой доступностью. Разработано программное обеспечение, позволяющее рассчитывать интегральный показатель доступности КПТС (св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2022614981), находить оптимальные топологии КПТС по данному критерию (св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2022614982), а также производить различные тесты над топологиями (св-во о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2022618511). Разработана имитационная модель, моделирующая работу алгоритма управления потоком, а также алгоритма поддержки низкоприоритетных сервисов. Осуществлена реализация алгоритма управления потоком в КПТС в виде модуля ядра операционной системы Linux.

В целом, предложенные алгоритмы и разработанные средства позволяют обеспечить повышение доступности от 10 до 22%, при обеспечении гарантированных задержек для высокоприоритетных сервисов и обеспечения справедливости при поддержке низкоприоритетных сервисов КПТС.

**Методология и методы исследования.** Научные положения работы теоретически обосновываются при помощи аппарата теории вероятностей, теории графов, теории систем массового обслуживания, математической статистики,

математического анализа, методов компьютерного моделирования и технологии объектно-ориентированного программирования. Для практической проверки работоспособности предложенных алгоритмов использовалось разработанное программное обеспечение.

**Соответствие паспорту специальности.** Проблематика, исследованная в диссертации, соответствует областям исследований 4, 5 паспорта специальности 2.2.15 – «Системы, сети и устройства телекоммуникаций»

**Достоверность и апробация.** Степень достоверности результатов исследования подтверждается рядом экспериментов, проводимых на исследуемых моделях с соблюдением требуемых условий случайности, и при помощи исследований, выполненных на экспериментальных установках, положительным результатом практического использования разработанных средств, а также апробацией в печати и на научных конференциях различного уровня.

Научно-практическая значимость работы подтверждена рецензируемыми публикациями в журналах и в сборниках научных трудов, докладами на научных конференциях международного и российского уровня, а также государственными Свидетельствами РФ о регистрации программ для ЭВМ.

Практическая значимость работы подтверждена внедрением её результатов в инновационную научную и образовательную деятельность ВлГУ, а также в центр обработки данных системы образования Владимирской области и в корпоративные сети компаний ООО «Рунет бизнес системы» г. Москва и ООО «Контактон» г. Владимир.

Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на XIV и XV Международных НТК IEEE «Динамика систем, механизмов и машин, Dynamics 2020, 2021» (Омск, 2020, 2021), V IEEE International Symposium on Smart and Wireless Systems в рамках серии международных НТК International Conferences On Intelligent Data Acquisition And Advanced Computing Systems, IDAACS-SWS 2020 (Дортмунд, Германия), 14th International Symposium «Intelligent Systems – 2020», INTELS'20 (Москва, 2020), Intelligent Systems Conference 2019, IntelliSys 2019 (Лондон, Великобритания), 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, IDAACS'2019 (Мец, Франция), Международной НТК «Перспективные технологии в средствах передачи информации, ПТСПИ-2019» (Владимир, 2019), 2nd European Conference on Electrical Engineering and

Computer Science, EECS 2018 (Берн, Швейцария), XI Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы передачи информации в инфокоммуникационных системах» (Волгоград, 2021), IX Всероссийской НПК по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности «Имитационное моделирование. Теория и практика, ИММОД-2019» (Екатеринбург, 2019).

По результатам диссертационной работы опубликовано 17 научных работ, в том числе 3 в изданиях, рекомендованных ВАК, проиндексированы в международных базах Scopus и Web of Science – 8, получено 4 свидетельства о регистрации программы для ЭВМ.

**Личный вклад.** Все результаты, изложенные в научно-квалификационной работе, получены автором лично или при его непосредственном участии. Постановка цели и задач, обсуждение планов исследований и полученных результатов выполнены совместно с научным руководителем.

Данное исследование проводилось, в том числе, в рамках работ по теме, поддержанной Российским Фондом Фундаментальных Исследований № 18-07-01109 «Алгоритмы и протоколы оценки и контроля доступности в крупномасштабных телекоммуникационных сетях» и государственного задания, тема ГБ-1186 (проект FZUN-2020-0013).

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка обозначений и сокращений, списка использованных источников из 136 наименований, 6 приложений и содержит 114 страниц основного текста, иллюстрированного 43 рисунками, содержит 14 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы диссертации. Формулируются цель и задачи исследований.

**В главе 1** анализируются методы обеспечения доступности в КТС, уточняются задачи исследования. КТС включает несколько подсетей, выделяемых для изоляции трафика, сетевое оборудование (коммутаторы, маршрутизаторы, межсетевые экраны, точки беспроводного доступа), VPN каналы, канал доступа в Интернет, сервера, рабочие станции, включая мобильные устройства. Топология (схема связей) такой сети неизменяемая. Если применяются технологии SDN, то эта схема взаимодействия виртуализированных устройств будет постоянно перестраиваться, сохраняя при этом функции сегментирования и

туннелирования.

Математическую модель КПТС представим в виде графа:  $G = \{U, V\}$ , где  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$  - множество узлов (виртуализированных на уровне South-bound сетевых устройств SDN, например, Open vSwitch),  $V = \{v_{ij}\}$  – множество ребер – линий связи (ЛС)  $v_{ij} \in \{1, 0\}$ ,  $i, j = \overline{1, n}$ . Веса ребер – показатели доступности ЛС (узла  $u_i$  относительно узла  $u_j$ )  $0 \leq a_{ij} \leq 1$ ,  $a_{ii} = 1$ . Если  $i$  и  $j$  не соединены друг с другом ( $v_{ij} = 0$ ), то в связной сети имеется, как минимум, один канал связи (КС) между  $u_j$  и  $u_i$ .

Под *доступностью сети*  $A(G)$  будем понимать вероятность того, что при заданной топологии сети определенные характеристики (сетевая связность, пропускная способность и т.д.) будут поддерживаться на заданном уровне. Показатель доступности КС, образованного между двумя узлами  $u_i$  и  $u_j$ , представляющего собой последовательное соединение ЛС узлов от истока к стоку определим выражением  $a_{ij}^{КС} = \prod_{z \in [i, j]} a_z$ , где  $a_z$  - показатели доступности линий связи на пути от  $u_i$  до  $u_j$ . Если имеется несколько КС от  $u_i$  до  $u_j$ , то  $a_{ij}$  определим усреднением:  $a_{ij} = \sum_{z_r \in Z} (\prod_{z_r \in [i, j]} a_{z_r}) / |Z^{ij}|$ , где  $z_r$ - КС с номером  $r$  из множества  $Z^{ij}$  каналов;  $a_{z_r}$  - показатели доступностей линий связи в канале  $z_r$  от  $i$ -го до  $j$ -го узла.

Определим диапазон показателя доступности выполняемой задачи с заданным качеством  $A(G)_{min} \leq A(G) \leq A(G)_{max}$ , здесь  $A(G)_{min}$  – минимально допустимый показатель доступности,  $A(G)_{max}$  – максимально возможный для данной сети. Введем показатель идеальной доступности сети  $A^*(G)$ , когда все КС доступны с вероятностью 1.

**Алгоритм определения интегрального показателя доступности сети**

Шаг 1. Строим матрицу смежности  $Y = \|y_{ij}\|$ ,  $i, j = \overline{1..n}$ , где  $y_{ij} = 1$ , если  $v_{ij} = 1$ , иначе  $y_{ij} = 0$ .

Шаг 2. С помощью модифицированного алгоритма Флойда-Уоршелла находим множества каналов связи между каждыми двумя узлами  $u_j$  и  $u_i$ :  $Z^{ij} = \{Z_1^{ij}, Z_2^{ij}, \dots, Z_{R_{ij}}^{ij}\}$ . Здесь  $R_{ij}$  – мощности множеств  $Z^{ij}$ .

Шаг 3. Вычислим показатели доступности всех КС между каждыми двумя  $u_i$  и  $u_j$ . Получим множества показателей:  $A(Z^{ij}) = \{A(Z_1^{ij}), A(Z_2^{ij}), \dots, A(Z_{R_{ij}}^{ij})\}$ .



Шаг 4. Найдем соответственно минимальный  $\hat{A}(G)_{min}$ , и максимальный  $\hat{A}(G)_{max}$  показатели доступности среди всех пар узлов.

Шаг 5. При помощи способа, предложенного Ю.М. Монаховым и др., основанном на вычислении расстояния Колмогорова для двух функций, определяем интегральный показатель доступности (ИПД) сети в виде  $A(G)_{min} = f_1(\hat{A}(G)_{min}, A^*(G))$ ,  $A(G)_{max} = f_2(\hat{A}(G)_{max}, A^*(G))$ , где  $f_1$  и  $f_2$  – функционалы, используемые в обозначенном подходе. Конец алгоритма.

Для повышения доступности сети предлагается два подхода: (1) оптимизировать топологию КПТС для достижения максимума ИПД; (2) повысить показатель доступности каналов связи  $a_{ij}$  за счет применения нового алгоритма управления потоком.

**Глава 2** содержит разработку алгоритмов оптимизации интегрального показателя доступности КПТС. Описывается порядок и условия проведенных экспериментов и анализ результатов.

Представим КПТС как систему. Элементами системы являются маршрутизирующее и коммутирующее оборудование и программируемые связи между ними. Функция системы – множество алгоритмов построения связей между этими элементами, которые зависят от решаемой задачи и состояния внешней среды. Состоянием внешней среды будем определять текущие значения показателей доступности элементов КПТС. Рассмотрим процесс реализации задачи средствами КПТС. Пусть в начальный момент времени имеем структуру связей (топологию), которая была сформирована вручную администратором КПТС или была «запомнена» по окончанию предыдущего решения данной задачи ( $S_0$ ). В процессе выполнения текущей задачи меняются значения  $a_{ij}$ ,  $i, j = \overline{1, n}$  за счет динамической маршрутизации (изменяемой маршрутной матрицы), и, соответственно, структуры связей. Можно представить, что за время решения задачи топология сети изменяется по закону  $(S_0, S_1, \dots, S_l, \dots, S_L)$ , где  $S_l$  принадлежит полному множеству структур  $S$  ( $S_l \in S$ ). Кроме того,  $S_l$  обладает обязательным свойством связности, т.е. всегда имеются пути между элементами, действующими в данный момент.

Постановка задачи: Требуется на каждом  $k$ -м шаге выполнения задачи синтезировать такую топологию  $S_k \in S$ , при которой ИПД сети элементов, участвующих в ее выполнении, принимает максимальное значение

$A(G) \xrightarrow{S_k \in S} \max$ , при этом должно быть обязательно обеспечен минимально допустимый показатель доступности.

Введем ограничение. Общее количество связей в  $S_k$  не должно превышать количество связей в  $S_0$ . Данное ограничение обосновывается следующим: можно предположить, что добавление связей вплоть до получения полносвязного графа повысит  $A(G)$ , что подтверждается расчетом и экспериментами, однако здесь не учитывается резкое возрастание нагрузки на контроллер, ограничения памяти коммутаторов ТСАМ, и прочие эффекты, оказывающие негативное влияние на доступность каналов связи. Кроме того, согласно инструкциям фирм-разработчиков максимальное количество связей ограничивается.

***Алгоритм оптимизации топологии КПТС по критерию максимума интегрального показателя доступности***

Дано  $S_0$  – начальная топология,  $n$  – количество элементов,  $m$  – количество связей между ними на начальный период выполнения задачи.

Шаг 1.  $S_k = S_0$ .

Шаг 2. Получить текущие значения  $a_{ij}(S_0)$ .

Шаг 3. По алгоритму определения ИПД сети рассчитать верхнее и нижнее граничные значения ИПД начальной топологии  $A(G(S_0))_{max}$  и  $A(G(S_0))_{min}$ .

Шаг 4. Получить остовное дерево графа  $G(S_0)$  последовательно исключая связи из  $S_0$ . Если таких деревьев несколько, то запомнить структуру  $S_k$  с максимальным ИПД сети, при этом минимальный ИПД должен быть не меньше, чем  $A(G(S_0))_{min}$ , количество связей  $m_k$ . Положить  $A_{max} = A(G(S_k))$ .

Шаг 5. Для потенциально возможных несуществующих  $(m - m_k)$  связей выполнить: последовательно добавлять в  $S_k$  связи между каждыми двумя не связанными друг с другом элементами, получая новые структуры  $S_k(1), S_k(2), \dots$ , каждый раз проверяя значение ИПД. Запомнить структуру  $S_k(l)$ , при которой текущее значение  $A(S_k(l))$  максимально, при этом минимальный ИПД должен быть не меньше, чем  $A(G(S_0))_{min}$ .

Шаг 6.  $k = k + 1$ . Если задача не выполнена, то  $S_k = S_k(l)$ ,  $A_{max} = A(S_k(l))$ , перейти к шагу 2, иначе конец алгоритма.

Для экспериментального исследования разработанного алгоритма создан стенд в среде Mininet, позволяющий формировать произвольные топологии

SDN, осуществлять маршрутизацию потоков трафика на базе контроллера ONOS, а также производить расчет показателей доступности.

На рисунке 1 представлена схема КПТС, смоделированной на стенде. Данная схема состоит следующих элементов: OpenFlow контроллер (ONOS), 100 оконечных устройств пользователей (PC 1-100), 15 коммутаторов (as1-6, bs1-5, cs1-4), 3 маршрутизатора (ar1-2, br1-2, cr1-2) и линий связи между ними.

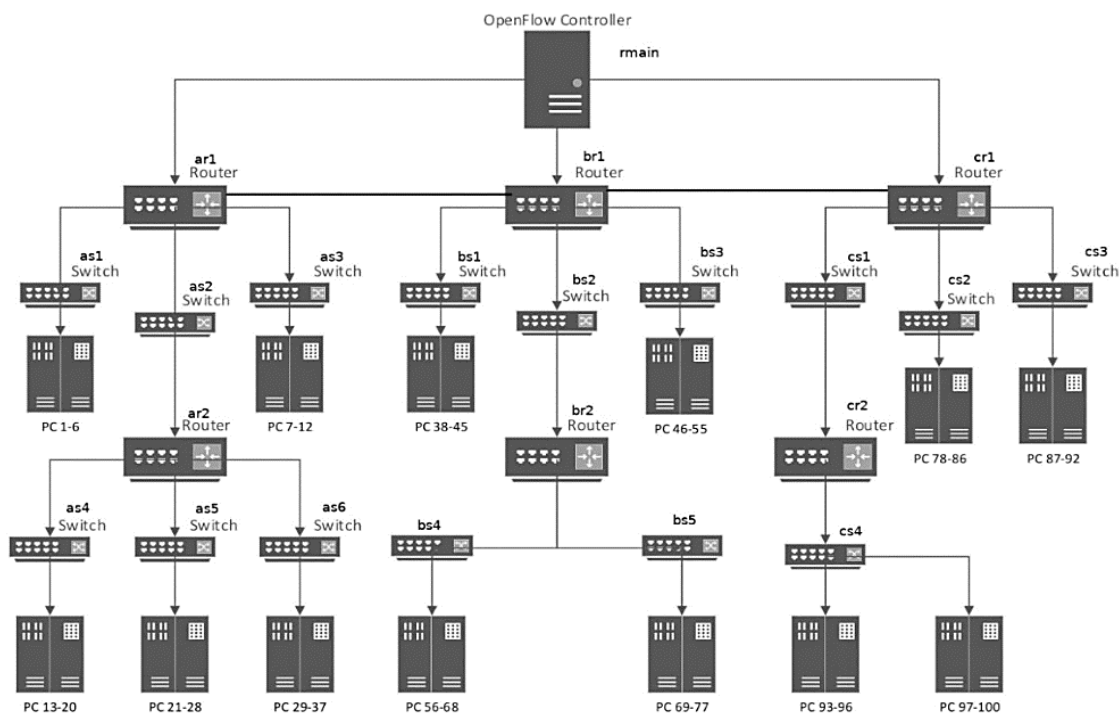


Рис. 1. Модель КПТС в среде Mininet.

Создано программное обеспечение на языке Java, позволяющее реализовывать все шаги разработанного алгоритма. Эксперименты заключались в следующем: с помощью Mininet генерировались топологии сети как подмножество узлов и связей, приведенных на рис. 1, для решения выбранной задачи (решаемая задача - типовые приложения для работы с электронным документооборотом на предприятии, охватывающая взаимодействие не менее 50% оконечных устройств пользователей). Запускаются процессы обмена сообщениями между узлами сети, имитирующие действующую сетевую нагрузку. С помощью разработанного скрипта определяются время отклика узлов относительно друг друга. На базе усреднений данных процессов определяются показатели средней доступности узлов (по 250 раз время отклика сравнивается с директивным). Таким образом формируется текущая матрица доступности. Если решение задачи требует нескольких этапов, то процедура эксперимента повторяется.

Далее реализуются процедуры алгоритма оптимизации топологии КПТС

по критерию максимума интегрального показателя доступности. Шаг за шагом изменяется топология, меняются ИПД  $A(G(S_k))_{min}$  и  $A(G(S_k))_{max}$ . Результирующая топология с максимальными интегральными показателями доступности (оптимальная топология) для одного из экспериментов приведена на рис. 2 (здесь а) -  $A(G(S_0))_{max} = 0,71$ ,  $A(G(S_0))_{min} = 0,7$ ; б) -  $A(G(S_k))_{max} = 0,83$ ,  $A(G(S_k))_{min} = 0,71$ ).

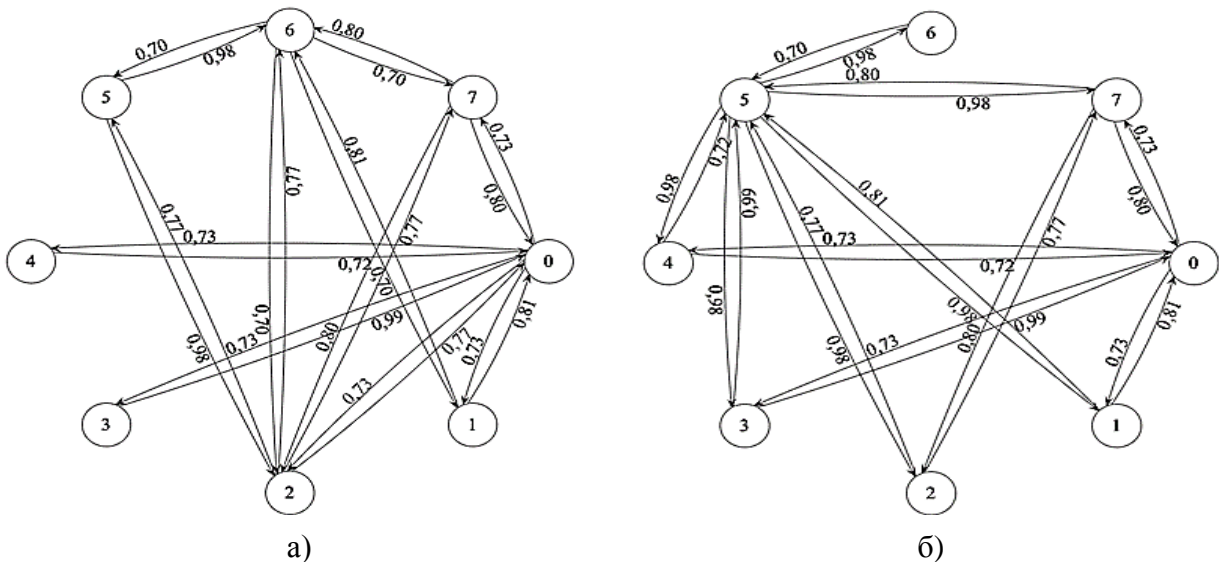


Рис. 2. Графы начальной и оптимальной топологий.

Эксперименты проводились с варьированием начальной топологии и каждый раз находилась оптимальная топология. ИПД зависел в основном от текущей нагрузки сети и варьировался в диапазоне от 0,6 до 0,8, при этом выигрыш

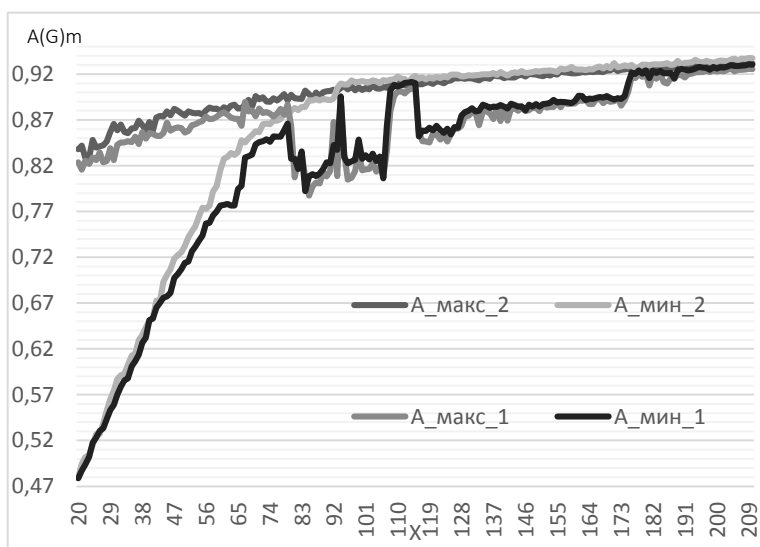


Рис. 3. График зависимости доступности сети от количества связей между устройствами.

по сравнению с исходным достигал 10-15%. Исследовалась зависимость выигрыша интегрального показателя доступности от количества связей между устройствами. Результаты исследования представлены на рис. 3. Наибольший эффект разработанный алгоритм показывает, когда при решении задачи задействовано много узлов.

**В главе 3** предлагается метод повышения доступности канала связи КПТС. Предлагается алгоритм планирования очередей передачи данных на основе приоритизации, который позволяет оптимизировать использование пропускной способности.

Одним из эффективных способов повышения доступности в КПТС является внедрение технологии QoS. Использование алгоритмов приоритизации и контроля трафика (ПКТ) позволяет отделять трафик функционирующих сервисов из общего потока и обеспечивать гарантированную полосу пропускания для них. Конфигурирование данных алгоритмов производится на основании выделения части КС для различных типов трафика. Однако, такое распределение не учитывает особенности проходящего трафика и не гарантирует обеспечение доступности трафика, чувствительного к задержкам канала. Тем самым, доступность сервиса понижается, что ведет к потенциальной угрозе безопасности системы. Данную проблему возможно решить путем разработки алгоритмов ПКТ, позволяющих оптимально распределять трафик, проходящий через КС, с целью повышения доступности определенных типов трафика.

Выявление параметров оптимизации. Исследования показывают прямую зависимость отклика сервиса от используемого алгоритма планирования очередей. Популярностью пользуется иерархический алгоритм «текущего ведра» (Hierarchical Token Bucket – НТВ), подразумевающий разделение полосы пропускания для определенных типов потока в отдельные классы, каждый из которых имеет свою собственную полосу пропускания. Алгоритм выстраивает данные классы в виде дерева.

На экспериментальной установке (рис. 4) было проведено исследование типовой конфигурации НТВ в различных режимах нагрузки. Целью эксперимента являлось определение ключевых аспектов, влияющих на обеспечение низкой задержки передачи пакетов при различной интенсивности входящего потока. Исходя из результатов анализа, были предложены следующие направления оптимизации параметров, влияющих на задержку передачи пакетов: контроль интенсивности входящего потока, динамическое изменение пропускной способности канала относительно входящей интенсивности, оптимизация предоставления полосы для классов трафика относительно входящей интенсивности.

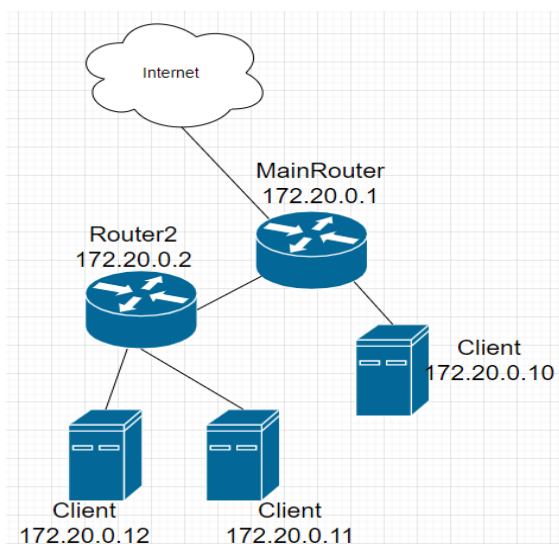


Рис. 4. Схема экспериментальной КСПД

Входные данные алгоритма. Подход подразумевает классификацию сетевого трафика по определенным признакам, таким как: IP-адрес узла назначения, узла источника, используемый порт узла назначения, узла источника, реализуемый протокол передачи данных. Каждому классу трафика определяется приоритет в соответствии с соглашением о качестве обслуживания (SLA). Для каждого класса определяется директивное время

задержки в очереди на ожидание передачи сетевым оборудованием. Каждый класс имеет свою очередь накопления пакетов. Выпуск пакетов в передающую очередь осуществляется со скоростью, рассчитанной на основании директивного времени и алгоритма планирования использования пропускной способности.

Опишем это множествами: классов трафика  $Kl = \{Kl_1, \dots, Kl_b\}$ , где  $b$  – количество классов, соответственно задается множество приоритетов класса:  $Pr = \{Pr_0, \dots, Pr_{b-1}\}$ , чем меньше значение  $Pr_i$ , тем выше приоритет; скоростей потока пакетов для каждого класса  $Sp = \{Sp_1, \dots, Sp_b\}$ ,  $\sum_{i=1}^b Sp_i \leq max\_rate$ , где  $max\_rate$  - максимальная пропускная способность интерфейса; множеством директивного времени обработки пакетов для каждого класса  $T^{обp} = \{T^{обp}_1, \dots, T^{обp}_b\}$ , соответственно интенсивности обслуживания пакетов  $\mu_i = 1/T^{обp}_i$ ; допустимых задержек в очередях для классов  $Del = \{Del_1, \dots, Del_b\}$ ; интенсивностей входящего трафика пакетов  $\lambda = \{\lambda_1, \dots, \lambda_b\}$ .

Алгоритм определяет одну очередь передачи для пакетов различных классов. Из очередей классов пакеты выходят с интенсивностью меньшей или равной  $\mu_i$ . Пакеты попадают в очередь последовательно в соответствии с приоритетами.

#### **Алгоритм планирования очередей передачи данных**

Шаг 1. Ввод исходных данных:  $Kl = \{Kl_1, \dots, Kl_b\}$ ,  $Pr = \{Pr_0, \dots, Pr_{b-1}\}$ ,  $T^{обp} = \{T^{обp}_1, \dots, T^{обp}_b\}$ ,  $max\_rate$ ,  $min\_delay$ ,  $MTU$ ,  $Sp = \{Sp_1, \dots, Sp_b\}$ ,  $\lambda = \{\lambda_1, \dots, \lambda_b\}$ .

Шаг 2. Поставить соответствие номеров классов приоритетам -  $Kl_0 = Pr_0, \dots, Kl_{b-1} = Pr_{b-1}$ .

Шаг 3. Если условие  $\sum_{i=0}^{b-1} Sp_i \leq max\_rate$  выполняется, то переход к шагу 4, иначе устанавливаем текущее значение времени обработки пакета для каждого класса в минимально допустимое время обработки:  $T_i^* = min\_delay$ ,  $i = 0, \dots, (b - 1)$ .

Шаг 4. Определяем суммарное количество токенов, которое в дальнейшем будем распределять по классам -  $Tok = max\_rate / (MTU \times 8)$ .

Далее производится распределение токенов по классам (полосы пропускания выпускающей очереди) таким образом, что более приоритетный класс забирает 2/3 доступных токенов (полосы пропускания), каждый следующий по приоритету класс занимает 2/3 полосы оставшейся после предыдущего по приоритету класса и так далее до последнего класса, который занимает оставшуюся полосу.  $i = 0$

Шаг 5. Количество токенов для  $i$ -го класса,  $Ent(.)$  – целая часть.

$$Tok_i = Ent\left(Tok \times \frac{2}{3}\right) + 1, \text{ если } \left(Tok \times \frac{2}{3}\right) > Ent\left(Tok \times \frac{2}{3}\right), Tok \times \frac{2}{3}, \text{ если } Ent\left(Tok \times \frac{2}{3}\right) = Tok \times \frac{2}{3}.$$

Шаг 6. Время обработки пакетов  $i$ -го класса  $T_i^* = (8 \times MTU) / (max\_rate \times Tok_i)$ .

Шаг 7. Если  $T_i^* \leq T^{обp}_i$  (меньше директивного), то  $\mu_i^* = 1/T_i^*$ ;  $i = i + 1$ ;  
Если  $i < b$  (остались классы), то переход к шагу 5,  
иначе если  $Tok = 0$  (не остались токены), то конец алгоритма;  
иначе конец алгоритма.

иначе если  $T_i^* \geq min\_delay$ , то  $Tok_i = Tok_i + 1$ ,  $Tok = Tok - 1$ ,

если  $Tok = 0$  (не остались токены), то конец алгоритма;

иначе переход к шагу 6;

иначе (токенов для  $i$ -го класса слишком много)

$Tok_i = Tok_i - 1$ ,  $Tok = Tok + 1$ , переход к шагу 6;

Если интенсивность входного потока в более приоритетном классе ниже выходной пороговой интенсивности, то следующий по приоритету класс может произвести повышение пороговой выходной интенсивности (при сохранении  $\sum_{i=1}^b Sp_i \leq max\_rate$ ). Право повышения пороговой выходной интенсивности переходит ниже стоящим по приоритету классам.

Если интенсивность потока пакетов больше пороговой интенсивности потока, то пакеты начинают отбрасываться для уравнивания интенсивности потока до пороговой интенсивности. Повышение или понижение интенсивности пакетов определяется в результате работы алгоритма планирования использования пропускной способности посредством перераспределения токенов НТВ.

**Алгоритм поддержки низкоприоритетных сервисов**

Шаг 1. Ввод:  $Kl, Pr, T^{обp}, max\_rate, min\_delay, MTU, Sp, \lambda$ .

Шаг 2.  $Kl_0 = Pr_0, \dots, Kl_{b-1} = Pr_{b-1}$ .

Шаг 3. Если  $\sum_{i=0}^{b-1} Sp_i \leq max\_rate$ , то переход к шагу 4, иначе  $T_i^* = min\_delay, i = 0, \dots, (b - 1)$ .

Шаг 4.  $Tok = max\_rate / (MTU \times 8)$ .

Шаг 5.  $Tok_i = Tok \times 2/3$

Шаг 6.  $T_i^* = (8 \times MTU) / (max\_rate \times Tok_i)$ .

Шаг 7. Если  $T_i^* \leq T^{обp}_i$ , то  $\mu_i^* = 1/T_i^*; i = i + 1$ ; если  $i < b$ , то - к шагу 5, иначе если  $Tok = 0$ , то конец алгоритма; иначе  $i = 0$ , переход к шагу 8;

иначе если  $T_i^* \geq min\_delay$ , то  $Tok_i = Tok_i + 1, Tok = Tok - 1$ ,

если  $Tok = 0$ , то конец алгоритма; иначе переход к шагу 6;

иначе  $Tok_i = Tok_i - 1, Tok = Tok + 1$ , переход к шагу 6;

Шаг 8. Если  $\lambda_i > \mu_i^*$  (Проверка соответствия интенсивности обслуживания интенсивности входящего потока пакетов, т.е. имеется возможность увеличить полосу передачи для  $i$ -го класса), то  $Tok_i = Tok_i + 1, Tok = Tok - 1$ , переход к шагу 6; иначе  $i = i + 1$ ; если  $i < b$  (остались классы), то переход к шагу 8, иначе конец алгоритма.

Для проверки эффективности разработанных алгоритмов было произведено имитационное моделирование их работы в среде AnyLogic в сравнении с работой алгоритма НТВ в типовой конфигурации. Состав моделируемой системы (рис. 5): очереди передачи пакетов с приоритетами 0 и 1; очередь передачи пакетов в среду передачи сигнала; планировщик распределения использования очереди передачи пакетов в среду для очередей с приоритетами. Задавались следующие ограничения: интенсивность пакетов в очередь передачи пакетов в среду передачи не может превышать значение  $max\_rate$ ; время обработки пакетов в очереди передачи пакетов в среду передачи всегда составляет  $min\_delay$ ; буфер очередей с приоритетами ограничен значением, равным 100 пакетам.



В рамках тестирования разработанного алгоритма было произведено сравнение задержек передачи пакетов каждой очереди при одинаковых нагрузках на канал очереди классов. Проводилось 5 тестовых съёмов задержки передачи пакетов. Режимы тестирования представлены в таблице 1.

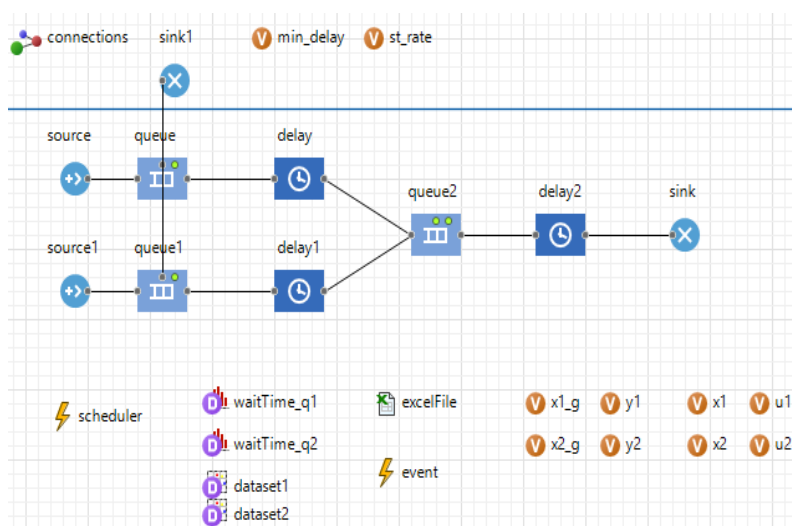


Рис. 5. Схема имитационной модели в AnyLogic

Таблица 1. Режимы тестирования моделей алгоритмов

Режим	Интенсивность очереди 1 (пакет/мс)	Интенсивность очереди 2 (пакет/мс)	Количество замеров
1	0,48	0,857	180
2	100	0,857	180
3	0,48	100	180
4	20,825	62,4	180

Результат сравнительного тестирования позволяет сделать вывод, что разработанный алгоритм планирования очередей передачи данных показывает более низкие суммарные значения задержки для различных классов трафика, тем самым обеспечивая доступность сервисов в обоих классах. Соответственно, он позволяет оптимизировать использование пропускной способности и обеспечивать минимально возможную задержку для приоритетных классов.

На рис. 6, а изображен график работы алгоритмов в режиме 1. При низкой интенсивности входящего потока оба алгоритма обеспечивают низкую задержку обработки пакетов. Однако для низкоприоритетной очереди НТВ задержка выше приоритетного класса, это обусловлено последовательностью права передачи пакетов на основании приоритета. На рис. 6, б представлен график работы алгоритмов в режиме 2. НТВ произвел выделение полосы для приоритетного класса и тем самым занял большую часть ресурсов сети, поэтому задержка во втором классе начала расти. Разработанный алгоритм в свою очередь определил, что интенсивность потока низкоприоритетного класса низкая,

тем самым можно обеспечивать низкую задержку для обоих классов, оставаясь в директивном времени.

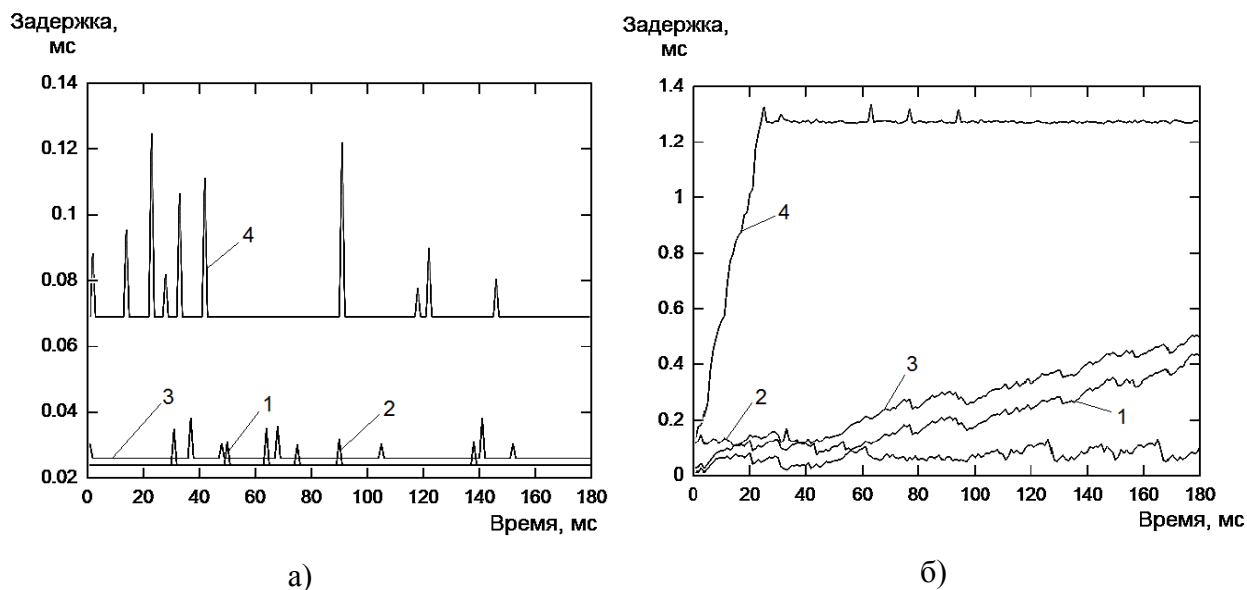


Рис. 6. Графики работы алгоритмов в режимах 1 (а) и 2 (б) 1 — очередь с приоритетом 0 (модификация НТВ); 2 — очередь с приоритетом 1 (модификация НТВ); 3 — очередь с приоритетом 0 (НТВ); 4 — очередь с приоритетом 1 (НТВ).

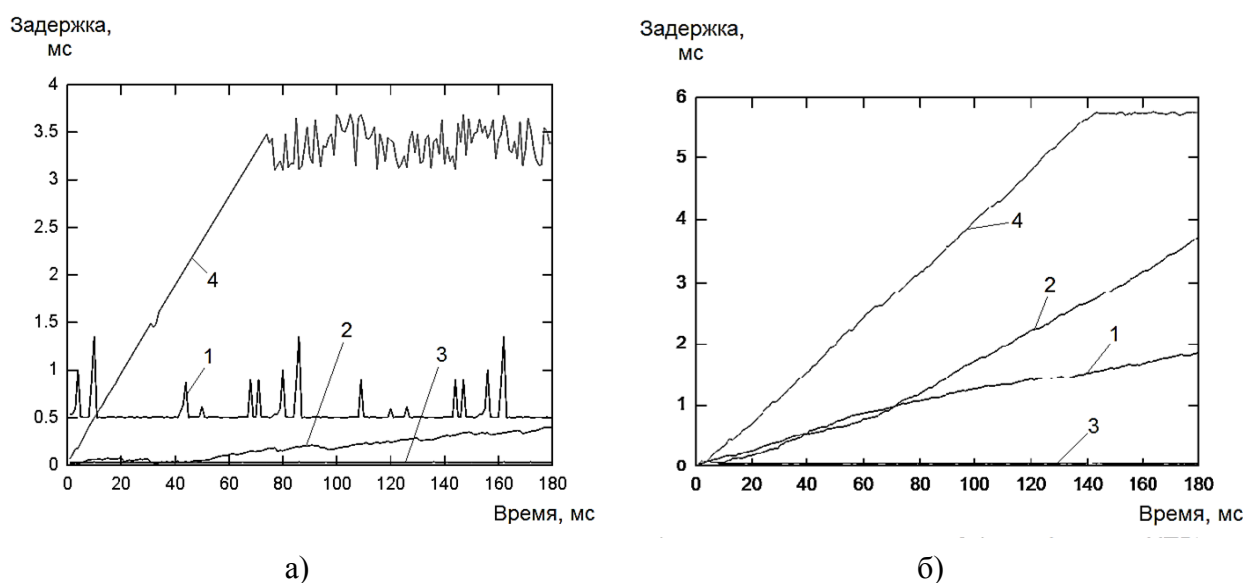


Рис. 7. Результаты тестирования моделей в режимах 3 (а) и 4 (б) 1 — очередь с приоритетом 0 (модификация НТВ); 2 — очередь с приоритетом 1 (модификация НТВ); 3 — очередь с приоритетом 0 (НТВ); 4 — очередь с приоритетом 1 (НТВ).

На рис. 7, а представлен график работы алгоритмов в режиме 3. НТВ определил низкую активность высокоприоритетного класса и позволяет низ-

коприоритетному классу использовать больше полосы. Разработанный алгоритм, в свою очередь, определил необходимое количество полосы для высокоприоритетного класса, чтобы выдавать пакеты с минимальной задержкой, а оставшуюся часть определил для низкоприоритетного. На рис. 7, б приведен график работы алгоритмов в режиме 4. Нагрузка на систему равняется 1, то есть это предел обработки пакетов без потерь. НТВ сохраняет заданную полосу для высокоприоритетного класса, не снижая его задержки, притом задержка низкоприоритетного класса сильно возросла.

Разработанный алгоритм производит расчет оптимального распределения полосы в пределах нагрузки на систему таким образом, чтобы обеспечить среднюю минимальную задержку для обоих классов. Но поскольку классы имеют разные приоритеты, задержка для высокоприоритетного класса определяется ниже. К тому же, интенсивность потока заявок высокоприоритетного класса ниже, чем у низкоприоритетного, и приоритетный класс получает 100% необходимой полосы, а низкоприоритетный только ту часть, которая осталась. Поэтому мы наблюдаем возрастание задержки для низкоприоритетного класса.

#### **Основные результаты диссертационного исследования:**

1. Проанализированы существующие решения задачи повышения доступности КПТС и ее компонентов, а также методики оценки показателей доступности. Выявлены ограничения, препятствующие достижению высокой доступности. Сформулирована задача оптимизации доступности при существующих ограничениях по вычислительной мощности контроллеров, ёмкости памяти и буфера для управления множеством виртуализированных узлов и множеством ЛС. Обоснована методика оценки показателя доступности сети и КС.

2. Создан экспериментальный стенд в среде Mininet, позволяющий формировать произвольные топологии SDN, осуществлять маршрутизацию потоков трафика, а также производить расчет показателей доступности. Эксперименты позволили выявить существенные факторы воздействия на топологию в SDN с высокой доступностью. Выявлена зависимость влияния связей между устройствами и количеством устройств в сетевой топологии на ИПД сети.

3. Разработан алгоритм оптимизации топологии КПТС, основанный на последовательной реконфигурации топологии сетевых средств коммутации и маршрутизации по критерию максимума ИПД, что позволяет подстраивать то-

пологию КПТС под изменяющиеся внешние условия и решаемую задачу. Экспериментальные исследования показали: оптимальная топология находилась каждый раз при многократном изменении начальной топологии; ИПД зависел в основном от текущей нагрузки сети и варьировался в диапазоне от 0,6 до 0,8, при этом выигрыш по сравнению с исходной топологией достигал 15%, а в ряде случаев до 22%. Наибольший эффект разработанный алгоритм показывает, когда при решении задачи задействовано много узлов.

4. Разработан алгоритм планирования очередей передачи данных на основе модификации известного подхода «маркерное ведро» (НТВ). Алгоритм позволяет обеспечивать минимально возможную задержку для приоритетных классов поддерживаемых сервисов, оптимизируя использование пропускной способности. Выявлены факторы, влияющие на задержку передачи пакетов в НТВ и позволяющих выполнять оптимальное планирование: контроль интенсивности входящего потока пакетов, динамическое изменение пропускной способности канала относительно входящей интенсивности, оптимизация предоставления полосы для классов трафика относительно входящей интенсивности.

5. Разработан алгоритм поддержки низкоприоритетных сервисов в условиях сильного доминирования высокоприоритетных сервисов, основанный на перераспределении токенов управления потоком, что позволяет обеспечить принцип справедливости в отношении всех сервисов, работающих в КПТС.

6. Для проверки эффективности разработанных алгоритмов было произведено имитационное моделирование их работы в среде AnyLogic в сравнении с работой алгоритма НТВ в типовой конфигурации. Результаты выявили, что разработанные алгоритмы показывают более низкие суммарные значения задержки для различных классов трафика, тем самым обеспечивая высокую доступность сервисов. Соответственно, предложенные алгоритмы позволяют оптимизировать использование пропускной способности и обеспечивать минимально возможную задержку для приоритетных классов трафика.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Научные статьи, опубликованные в журналах из перечня ВАК**

1. Матвеева (Кузнецова) А. П. Постановка задачи оптимизации доступности в корпоративных программно-определяемых телекоммуникационных сетях // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. - 2021. - № 9(2).

2. Кузнецова А. П. Экспериментальная проверка результатов по оценке живучести корпоративной телекоммуникационной сети / Сурков Е.В., Монахов Ю.М., Кузнецова А.П. // Проектирование и технология электронных средств. – 2019. – № 3. – С. 46-50.

3. Кузнецова А. П. Репутация интернет-источников данных в информационно-аналитической деятельности администратора безопасности / Кузнецова А. П., Монахова Г. Е., Монахов М. Ю. // Динамика сложных систем-XXI век. – 2016. – Т. 10. – №. 4. – С. 78-81.

**Научные публикации, индексируемые в международных базах  
Scopus и/или Web of Science**

4. Kuznetsova A. Traffic queue management algorithm for availability control in telecommunication networks / Monakhov Y., Kuznetsova A., Ismailova M. // Vestnik of Saint Petersburg University. Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes. – 2019. - № 3(15). - С. 385–396.

5. Matveeva A. Algorithm for Maximization of Integral Availability in Software Defined Network / Monakhov Y., Monakhov M., Telny A., Matveev, S. // 2021 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). – IEEE, 2021. – С. 1-6.

6. Kuznetsova A. Disrupting the Connectivity of Multiagent Peering Networks: a Model Study / Monakhov Y., Kuznetsova A., Gerasimova M., Kulikov I. // Procedia Computer Science. – 2021. – Т. 186. – С. 418-425.

7. Kuznetsova A. Performance Evaluation of the Modified HTB Algorithm / Monakhov Y., Kuznetsova A., Monakhov M., Telny A., Bednyatsky I. // 2020 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). – IEEE, 2020. – С. 1-5.

8. Kuznetsova A. An Approach for Managing Availability in Software Defined Network Infrastructure / Monakhov Y., Kuznetsova A., Mamaev D. // 2020 IEEE 5th International Symposium on Smart and Wireless Systems within the Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS-SWS). – IEEE, 2020. – С. 1-6.

9. Kuznetsova A. P. Availability as a metric for region-scale telecommunication designs / Monakhov, Y. M., Monakhov, M. Y., Luchinkin, S. D., Kuznetsova, A. P., Monakhova, M. M. // 2019 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS). – IEEE, 2019. – Т. 2. – С. 775-779.

10. Kuznetsova A. On the behavior of drop-tail queue management algorithms

under high packet loss / Monakhov Y., Kuznetsova A. //WSEAS Transactions on Systems and Control. – 2019. – Т. 14. – С. 90-96.

11. Kuznetsova A. A Machine-Synesthetic Approach To DDoS Network Attack Detection / Monakhov Y., Nikitin O., Kuznetsova A., Kharlamov A., Amochkin A. // Proceedings of SAI Intelligent Systems Conference. - Springer, 2019. - С. 179-191.

12. Kuznetsova A. Analysis of Congestion Control in Data Channels with Frequent Frame Loss / Monakhov Y., Kuznetsova A. //2018 2nd European Conference on Electrical Engineering and Computer Science (EECS). – IEEE, 2018. – С. 445-449.

#### **Публикации в прочих изданиях**

13. Кузнецова А.П. О возможности применения импульсной передаточной функции для моделирования поведения сетевого устройства / Монахов Ю.М., Кузнецова А.П., Леткова Н.С., Шобин С.В. // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – №. 2. – С. 110-113.

14. Матвеева А.П. Об оптимизации топологии корпоративных программно-определяемых сетей по критерию доступности //Проблемы передачи информации в инфокоммуникационных системах. Сборник докладов и тезисов XI Всероссийской научно-практической конференции. – 2021. – С. 21-26.

15. Матвеева А.П. Способ и устройство измерения времени задержки на двустороннее распространение трафика данных в телекоммуникационной сети / Матвеев С.Н., Матвеева А.П. //Проблемы передачи информации в инфокоммуникационных системах. Сборник докладов и тезисов XI Всероссийской научно-практической конференции. – 2021. – С. 17-21.

16. Кузнецова А. П. Доработка имитационной модели алгоритмов приоритизации в сетях TCP/IP / Ниязов Р. Х., Монахов Ю. М., Бедняцкий И. С., Балашов В. И., Кузнецова А. П. // Девятая всероссийская научно-практическая конференция по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. – 2019. – С. 479-485.

17. Кузнецова А.П. Постановка задачи адаптивного управления очередями для повышения доступности узлов в сетях TCP/IP с частыми потерями кадров / Кузнецова А.П., Монахов Ю.М. // Перспективные технологии в средствах передачи информации - ПТСПИ-2019. Материалы XIII международной научно-технической конференции. В 2-х томах. – 2019. – С. 75-78.

18. Матвеева А.П. Программа оптимизации топологии SDN по критерию

доступности. Модуль абстракций [Текст]: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022614981 / Матвеева А.П., Матвеев С.Н. - № 2022614981; заявл. 28.03.2022; зарегистр. 28.03.2022.

19. Матвеева А.П. Программа оптимизации топологии SDN по критерию доступности. Модуль реализаций [Текст]: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022614982 / Матвеева А.П., Матвеев С.Н. - № 2022614982; заявл. 28.03.2022; зарегистр. 28.03.2022.

20. Матвеева А.П. Программа оптимизации топологии SDN по критерию доступности. Модуль моделирования [Текст]: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022618511 / Матвеева А.П., Матвеев С.Н. - № 2022618511; заявл. 28.03.2022; зарегистр. 15.05.2022.

21. Кузнецова, А.П. Программа для идентификации импульсных характеристик сетевого устройства [Текст]: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2019662083 / Ю.М. Монахов, Н.С. Леткова, С.В. Шобин, А.П. Кузнецова. - № 2019662083; заявл. 30.08.2019; зарегистр. 16.09.2019.

**Матвеева Анна Павловна**

## **Модели и алгоритмы обеспечения доступности в корпоративной программно-определяемой телекоммуникационной сети**

### **Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 01.07.2022 г.

Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз.

Издательство Владимирского государственного университета  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых  
600000, Владимир, ул. Горького, 87.