

На правах рукописи

Спиркина Анастасия Валентиновна

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И МЕТОДИКИ
ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМ РАСПРЕДЕЛЁННОГО РЕЕСТРА
И ОЦЕНКИ ИХ ВЛИЯНИЯ НА СЕТЕВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» на кафедре инфокоммуникационных систем.

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Елагин Василий Сергеевич

Официальные
оппоненты: **Ивакин Ян Альбертович**,
доктор технических наук, профессор,
АО «Концерн «Океанприбор», заместитель
генерального директора по инновациям
и проектам гражданского назначения

Маркелов Олег Александрович,
кандидат технических наук,
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина), НОЦ «Цифровые
Телекоммуникационные Технологии»,
ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный
университет», г. Санкт-Петербург

Защита состоится 28 сентября 2022 года в 14.00 на заседании диссертационного совета 55.2.004.01, созданном на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», по адресу: Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1, ауд. 554/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУТ по адресу Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1 и на сайте www.sut.ru.

Автореферат разослан 28 июля 2022 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 55.2.004.01,
д-р техн. наук, доцент

М.А. Маколкина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время значительное развитие получила технология распределённого реестра из-за децентрализации и возможности организации безопасного, целостного, надежного обмена и хранения данных. Самым распространённым примером таких реестров является технология блокчейн. Блокчейн представляет собой децентрализованную и неизменяемую цифровую систему записи, которая используется многими независимыми сторонами и может быть обновлена только с их согласия, что подразумевает полное отсутствие контроля над системой. Данная технология связана с разработкой и внедрением систем, которые могут использоваться для подтверждения подлинности личности и заключения контрактов, безопасного администрирования сетей, хранения сертификатов, проведения безопасных двусторонних сделок без привлечения гарантирующей третьей стороны, фиксации времени проведения определенной операции.

Технология блокчейна представляет собой специализированную информационно-коммуникационную технологию с некоторыми специфическими особенностями. Ключевыми объектами системы, определяющими новые возможности, являются узлы, транзакции и алгоритмы консенсусов.

Технология предполагает задействовать большое число узлов на сети для решения задач с дополнительным объемом служебного трафика и постоянным обменом данными. В зависимости от алгоритмов, протоколов взаимодействия и распространения данных могут появляться различные сетевые эффекты. В силу существенной востребованности технологии появляется ключевая задача проанализировать влияние процессов данной технологии на сетевые характеристики для прогнозирования поведения трафика и обеспечения требуемых показателей качества, а также на стабильность элементов сети связи общего пользования при работе технологии блокчейн.

Степень разработанности темы. В последние годы появилось довольно большое количество работ российских и зарубежных авторов, посвященных

исследованию технологии распределённого реестра и специфических особенностей его трафика.

На сегодняшний день в научных школах, возглавляемых российскими и зарубежными учеными Б.С. Гольдштейном, А.Е. Кучерявым, Е.А. Кучерявым, В.Л. Достовым, К.Е. Самуйловым, В.В. Корховым, Р.В. Киричком, S. Kasahara, Q. Xia, Y. Sun, L. Cocco и др., ведутся работы по исследованию технологии распределённого реестра и её влиянию на сеть. Во многих работах рассматривается применение технологии распределённого реестра в различных отраслях, однако стоит отметить, что малое количество исследований рассматривает непосредственное влияние технологии на сеть при изменении параметров системы, а также влияние сетевых эффектов на систему блокчейн. Математические и имитационные модели позволили бы проводить расчет необходимого оборудования, снизить стоимость систем и избежать негативных сетевых эффектов при внедрении решений на базе технологии блокчейн.

Объект исследования — сеть передачи данных при использовании технологии распределённого реестра.

Предмет исследования — влияние технологии распределённого реестра на сетевые характеристики.

Цель работы и задачи исследования

Целью диссертационной работы является разработка модели и методов применения систем распределённого реестра, необходимых для обеспечения требуемых показателей качества услуг, а также стабильности состояния элементов сети.

Для достижения поставленной цели в данной диссертационной работе должны решаться следующие *задачи*:

1. Проведение анализа технологии распределённого реестра, оценка перспективы её развития, анализ технических, технологических, нормативно-правовых и стандартизирующих особенностей деятельности.

2. Описание ключевых параметров работы блокчейн-технологии, компонентов сети и цепочки блокчейн, сценария обмена данными между объектами инфраструктуры, анализ сравнения основных разновидностей алгоритмов консенсуса, анализ сетевых характеристик функциональных

элементов и их зависимости, необходимые для прогнозирования поведения системы.

3. Разработка аналитической модели сети блокчейн для исследования характеристик трафика сети.

4. Разработка модельной сети блокчейн для исследования характеристик и функциональных элементов сети.

5. Разработка имитационной модельной сети для подтверждения результатов выявленных характеристик.

6. Разработка методики и рекомендаций по внедрению технологии блокчейн и организации сетевой инфраструктуры.

Научная новизна результатов исследования

Научная новизна полученных в данной диссертационной работе результатов состоит в следующем:

1. Проведён комплексный анализ параметров и характеристик блокчейна для достижения наилучших показателей производительности и масштабируемости при разработке и внедрению технологии блокчейн в требуемую систему.

2. Разработана аналитическая модель для расчета сетевых характеристик в блокчейн системах, в основу которой впервые положена оригинальная концепция трехэтапного моделирования СМО $M/M/1$, $M/H_2/1$, $G/D/1$.

3. Разработана имитационная модель фрагмента сети с учетом работы технологии блокчейн, включающая обобщенную модель трафика и учитывающая свойства процессов подсистемы.

4. Сформулированы новые подходы и используется оригинальный алгоритм по внедрению и настройке различных параметров блокчейна.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость диссертационной работы состоит, прежде всего, в установлении зависимости и существенного влияния числа узлов и интенсивности формирования транзакций в блокчейн системе на сетевые характеристики, например, на время пребывания заявки в системе; число узлов блокчейн, количество и мощность валидаторов, размер блоков и интервал времени подтверждения блоков также будет значительно влиять на характеристики сети; получены аналитические зависимости времени добавления

транзакций в цепочку блокчейн от различных параметров, таких как количество узлов инициирующих создание транзакций, настройки системы и других; разработана имитационная модель для проведения оценки задержки пакетов и других показателей работы системы, так и для выявления пороговых требований при проектировании системы; разработана методика для подбора характеристик блокчейна, учитывающая требования сетевых характеристик, которые позволят разработчикам и операторами связи учесть на этапах проектирования, эксплуатации и модернизации систем и сетей и осуществить высокий темп освоения новых технологий и создания инновационной продукции, которые дополнительно смогут обеспечить эффективность национальных стратегий.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в том, что предложенные методы могут быть использованы для определения параметров при подготовке и модернизации сетевой инфраструктуры при внедрении технологий распределённого реестра, предварительные расчеты помогут подготовить сеть к работе с необходимым количеством устройств и ожидаемым повышением надёжности работы системы; аналитическая модель позволит произвести расчеты необходимые для проектирования системы блокчейн, которая учитывает сетевые характеристики и параметры работы блокчейна; имитационная модель позволит провести оценку работы системы при различных конфигурациях блокчейна, что обеспечит снижение затрат при подготовке и модернизации сетевой инфраструктуры; использование алгоритма по выбору блокчейн системы и алгоритма консенсуса и методики по внедрению и настройке позволило провести предварительную оценку использования технологий блокчейна для интеграции в перспективное решение, заранее подобрать параметры блокчейна в зависимости от конкретного контекста и оценить необходимые инфраструктурные изменения для удовлетворения необходимых показателей. Даны рекомендации для оператора связи с целью обеспечения заданного качества услуг и снижения затрат. Представлены рекомендации по внедрению блокчейн решения в одну из перспективных технологий, такую как V2X, которые показали теоретическую возможность снизить задержки на 39%.

Методология и методы исследования. Проводимые исследования базируются на методах системного анализа, теории массового обслуживания,

теории вероятности, математической статистике. Для проверки некоторых теоретических положений применялся метод имитационного моделирования на основе пакетов имитационного моделирования AnyLogic, применялся метод моделирования на основе пакетов автоматического проектирования Mathcad.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Определены параметры и сетевые характеристики системы для достижения наилучших показателей производительности и масштабируемости при разработке и внедрению технологии блокчейн в требуемую телекоммуникационную систему.

2. Аналитическая модель фрагмента сети связи с внедрением блокчейна.

3. Имитационная модель системы блокчейн и сети с внедрением трафика блокчейн приложений.

4. Методика по внедрению и настройке различных параметров блокчейна.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных автором научных и практических результатов определяется обоснованным выбором исходных данных при постановке частных задач исследования, основных допущений и ограничений, принятых в процессе математического моделирования, соответствием расчетов с результатами экспериментальных исследований, проведенных лично автором, согласованностью с данными, полученными другими авторами и апробацией результатов исследований на международных, всероссийских и ведомственных научно-технических конференциях и конгрессах. Основные теоретические и практические результаты работы реализованы в учебном процессе кафедры Инфокоммуникационных систем Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича при чтении лекций, проведении практических занятий и лабораторных работ в рамках факультативных занятий, а также при выполнении научно-исследовательских работ для Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации, Российского фонда фундаментальных исследований и Комитета по науке и высшей школе Санкт-Петербурга.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на таких конференциях, как Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board

Communications conference proceedings (Москва, 2019, 2020), Международной научно-технической и научно-методической конференции «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» (Санкт-Петербург, 2019–2021), V Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Модернизация информационной инфраструктуры для сетей 5G/ИМТ 2020 и для других перспективных технологий в интересах трансформации регионов РОСИНФОКОМ-2019» (Санкт-Петербург, 2019), 12th International congress on ultra modern telecommunications and control systems and workshops (ICUMT) (Brno, Czech Republic, 2020).

Публикации по теме диссертации. Всего соискателем по теме диссертации опубликовано 32 работ, из них: 6 статей опубликовано в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК; 1 результат интеллектуальной деятельности; 15 работ опубликовано в изданиях, индексируемых в международных базах данных; 4 – в других изданиях и материалах конференций.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа соответствует пунктам паспорта специальности «Системы, сети и устройства телекоммуникаций»: 3. Разработка эффективных путей развития и совершенствования архитектуры сетей и систем телекоммуникаций и входящих в них устройств; 11. Разработка научно-технических основ технологии создания сетей, систем и устройств телекоммуникаций и обеспечения их эффективного функционирования; 14. Разработка методов исследования, моделирования и проектирования сетей, систем и устройств телекоммуникаций.

Личный вклад автора. Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований получены автором самостоятельно. В работах, опубликованных в соавторстве, соискателю принадлежит основная роль при постановке и решении задач, а также обобщении полученных результатов.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы и приложений. Общий объём работы 185 страниц, из них основного текста 159 страниц. Работа содержит 41 рисунок и 12 таблиц. Список литературы включает 240 источника.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, научная новизна, рассмотрены теоретическая и практическая ценность исследования, приведены сведения об опубликованных работах и выступлениях на конференциях, представлены положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертационной работы проводится обзор концепции технологии распределенного реестра, понятия блокчейн, история появления и развития технологии; проведено исследование полученных учёными результатов в данной области; проведен обзор существующей на данный момент нормативно-правовой и стандартизирующей базы в данной области; рассматриваются сферы применения, существующие решения на базе блокчейн и перспективы развития рынка. Отмечен ряд барьеров, которые могут замедлить или прекратить развитие технологии в разных областях. Такими ограничениями могут стать: некачественная проработка законодательной власти в области работы с технологией, децентрализация (вероятность необновления программного обеспечения на всех устройствах) и масштабируемость (появление узких мест на сети, снижение скорости обработки транзакций), низкое количество квалифицированных в данной области специалистов, затраты на внедрение и поддержку. Тем не менее, со временем риски и барьеры должны смягчиться и способствовать принятию технологии. Представленная нормативно-правовая база в исследуемой области показывает существенный интерес отрасли за последние годы, что так же позволяет сделать вывод о значимости и перспективности деятельности технологии блокчейн. При этом слабо охваченной сферой исследований является оценка влияния широкого распространения технологии распределённого реестра на качество обслуживания сетей связи общего пользования.

Во второй главе описываются технологические аспекты блокчейн систем, методы и алгоритмы работы ключевых параметров сетевой инфраструктуры, которые позволяют определить основные принципы работы технологии. Рассматриваются различные алгоритмы консенсуса, приводится сравнение

основных разновидностей алгоритмов консенсуса, что позволяет сделать вывод о многообразии систем и параметров технологии. Приводятся требования к системе и рассматриваются различные параметры, которые позволят упростить выбор и настройку при разработке или подстройке решения. Оценка влияния параметров системы для достижения наилучших показателей производительности и масштабируемости при разработке и внедрению технологии блокчейн в требуемую систему. Рост числа узлов блокчейн также будет значительно влиять на характеристики сети. Детальное исследование зависимостей и технологических особенностей позволит оценить, насколько каждый узел будет загружать сеть и как скажется этот рост на характеристиках сети и системы, которые необходимы для качественной работы сети. Предварительные расчеты помогут подготовить сеть к работе с необходимым количеством устройств.

В третьей главе представлена аналитическая модель исследуемой подсистемы, моделирующая работу фрагмента сети, позволяющая провести оценку задержки пакетов и других сетевых характеристик.

Процесс работы блокчейн системы предлагается рассмотреть, как три ключевых этапа:

- 1) создание и проверка транзакции;
- 2) включение в блок, валидация;
- 3) верификация и выполнение.

Каждый этап можно моделировать как отдельный процесс для оценки и подстройки предполагаемой системы, а также поиска и устранения уязвимых мест. На рисунке 1 (см. ниже) представлена модель системы, на которой отражены данные этапы.

Этап 1. Создание транзакции.

На первом этапе клиенты инициируют транзакцию, а также отправляют подписанные данные одному или нескольким узлам в зависимости от выбранного алгоритма консенсуса для проверки, если это предусмотрено системой.

При этом для оценки времени пребывания заявки на этапе используем известную для данной системы формулу:

$$T_1 = \frac{\mu^{-1}}{1 - \rho}, \quad (1)$$

где μ – средняя интенсивность обслуживания; ρ – коэффициент использования системы.

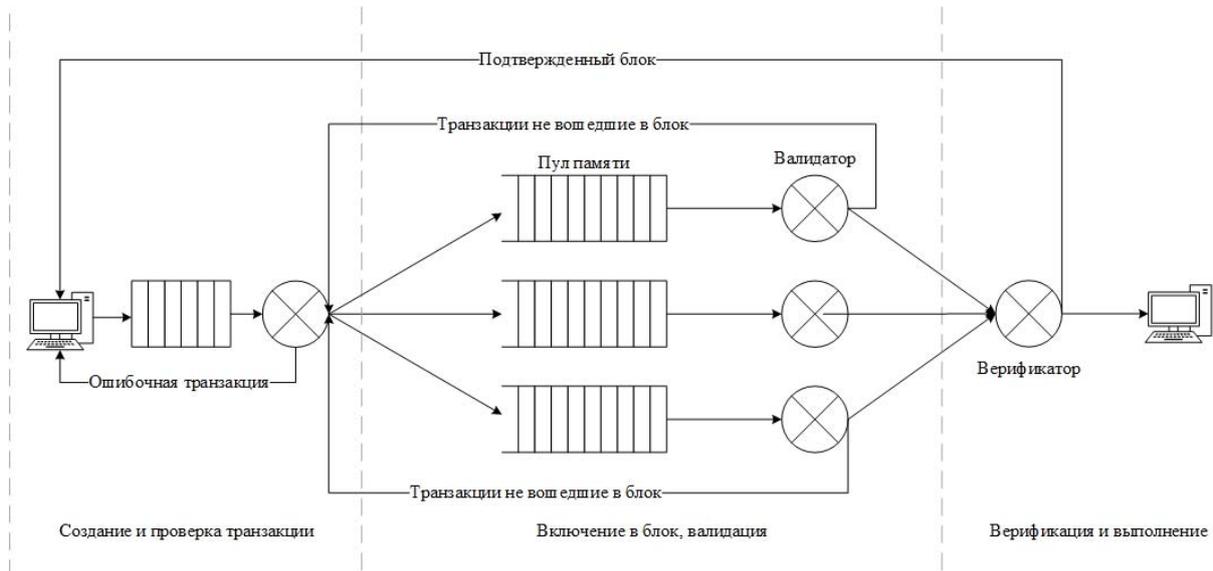


Рисунок 1 – Модель системы блокчейн

Этап 2. Включение в блок.

После этапа подтверждения корректности, транзакции попадают в MemoryPool, где собирается определенное количество транзакций близкое к установленному размеру блока, и передается на узел валидатора. Среднее время пребывания заявки на этапе примет следующий вид:

$$T_2 = \frac{\lambda((1-a)\mu_1 + a\mu_2)}{\mu_1\mu_2} + \left[\frac{\lambda((1-a)\mu_1 + a\mu_2)}{\mu_1\mu_2} \right]^2 \frac{1 + \frac{2((1-a)\mu_1^2 + a\mu_2^2)}{\mu_1\mu_2}}{2 \left(1 - \frac{\lambda((1-a)\mu_1 + a\mu_2)}{\mu_1\mu_2} \right)}, \quad (2)$$

где a – параметр формы; λ – средняя интенсивность поступления заявки.

Исходя из работы системы блокчейн на следующем этапе под заявками подразумевается – блок, так как в процессе валидации транзакции объединяются в блок и составляют с ним неделимый объект.

Этап 3. Верификация.

Валидатор отправляет новый блок одноранговым узлам-верификаторам. Каждый одноранговый узел проверяет блок независимо от других верификаторов.

Среднее время пребывания заявки на этапе примет следующий вид:

$$T_3 = \frac{\rho E[Y](C_A^2 + C_B^2)}{2(1 - \rho)}, \quad (3)$$

где: C_A – коэффициент вариации интервала между заявками; C_B – коэффициент вариации времени обслуживания; $E[Y]$ – состояние сервера в момент времени.

Один из способов анализа многозвенных схем – построение вероятностных графов. Представим схему с рисунка 1 в виде графа на рисунке 2. В данной схеме нас интересуют только ребра и узлы, которые способствуют добавлению транзакции в реестр. Таким образом, для расчета возможных потерь необходимо определить вероятность успешного установления пути между точками А и В.

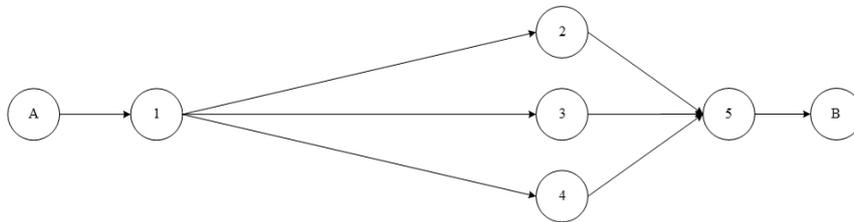


Рисунок 2 – Граф системы блокчейн

Средняя задержка пакета в сети массового обслуживания ($\overline{T_{abc}}$) может оцениваться с учетом вероятностей:

$$\begin{aligned} \overline{T_{abc}} = & \left(\frac{\mu^{-1}}{1 - \rho} + \frac{\lambda((1-a)\mu_1 + a\mu_2)}{\mu_1\mu_2} + \left[\frac{\lambda((1-a)\mu_1 + a\mu_2)}{\mu_1\mu_2} \right]^2 \right) * \\ & * \frac{1 + \frac{2((1-a)\mu_1^2 + a\mu_2^2)}{\mu_1\mu_2}}{2 \left(1 - \frac{\lambda((1-a)\mu_1 + a\mu_2)}{\mu_1\mu_2} \right)} + \frac{\rho E[Y](C_A^2 + C_B^2)}{2(1 - \rho)} * P_{A-1} P_{5-B} * \\ & * (1 - (1 - P_{1-2} P_{2-5})(1 - P_{1-3} P_{3-5})(1 - P_{1-4} P_{4-5})), \end{aligned} \quad (4)$$

где P_{i-j} – вероятность успешного создания пути между точками i и j .

В данной главе также описана разработка и настройка стенда сети блокчейн, проведён анализ характеристик функциональных элементов сети, приведено описание ключевых результатов эксперимента, представлены зависимость распределения числа пакетов от их размера и зависимость плотности распределения временных интервалов между пакетами.

Создана имитационная модель системы блокчейн и сети с внедрением трафика блокчейн приложений, включающая обобщенную модель и

учитывающая свойства процессов подсистемы. Предложенная модель представляет средство для выявления многих важных показателей, таких как интенсивность появления транзакций в секунду, размер блоков, время обработки блоков валидаторами, влияющие на определенные характеристики, например, время ожидания в пуле памяти, время пребывания пакетов в системе, задержка транзакций и другие.

Представленная в диссертации модель выполнялась в программе AnyLogic 8 Professional 8.7.9 Сборка: 8.7.9.202112171627 x64 и состоит из 3 типов агентов: Block, Main и User. Отображение агента Main в среде AnyLogic представлено на рисунке 3.

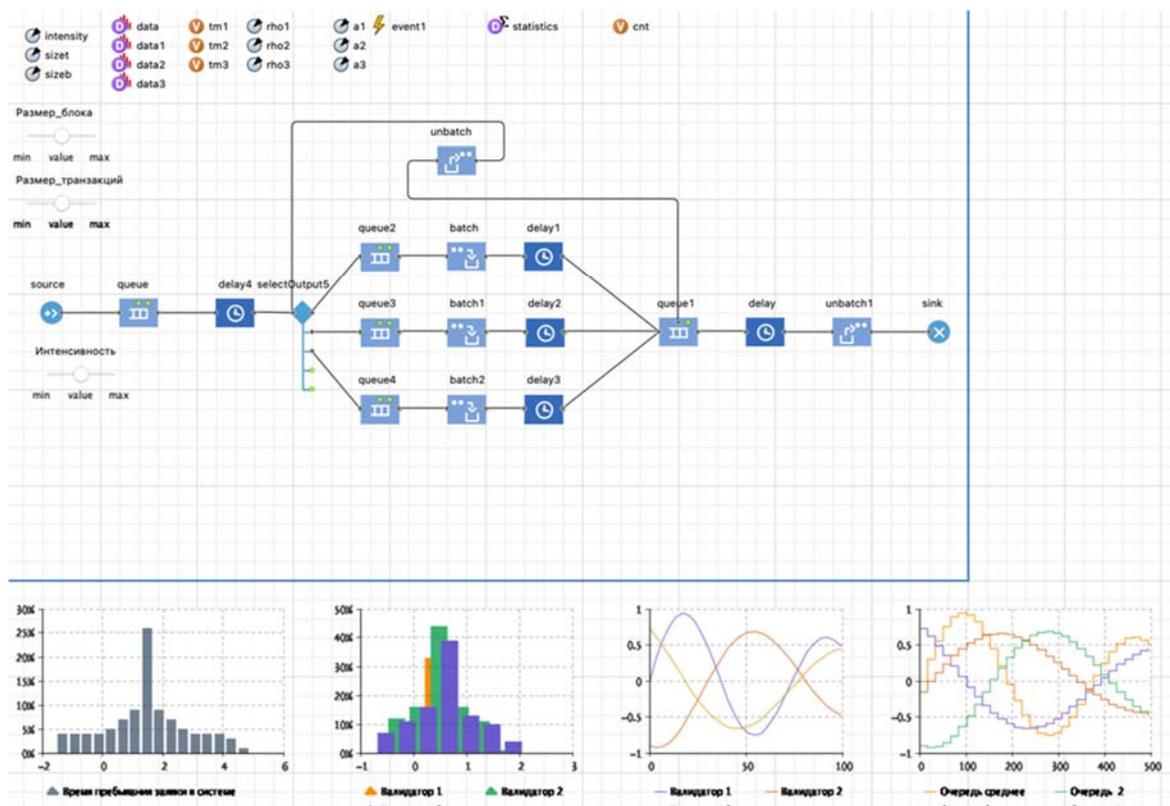


Рисунок 3 – Графическое отображение агента Main в среде AnyLogic

В рамках моделирования был проведен ряд экспериментов, позволяющий рассмотреть различные конфигурации и определить наиболее подходящие параметры. Данные результаты показали, что правильная настройка параметров системы блокчейн важна для снижения задержки, оптимального построения сетей и экономии средств. Для модели с заданными характеристиками и средней интенсивностью формирования транзакций 100 транзакций в секунду

оптимальным будет выбор таких параметров: размер пула, рассчитанный на 7–10 транзакций, размер блока около 1 кбайт, однако при изменении средней интенсивности формирования транзакций параметры следует оптимизировать.

Следует отметить, что результаты, полученные в аналитической модели, сопоставляются с измерениями в имитационной модели (рисунок 4), однако есть некоторые отличия, которые связаны с тем, что в аналитической модели не учитываются заявки, которые были возвращены валидаторами и некоторыми особенностями модели, например, учетом размеров транзакций и блоков. Для систем с интенсивностью формирования транзакций ниже 90 транзакций в секунду предпочтительнее использовать имитационную модель.

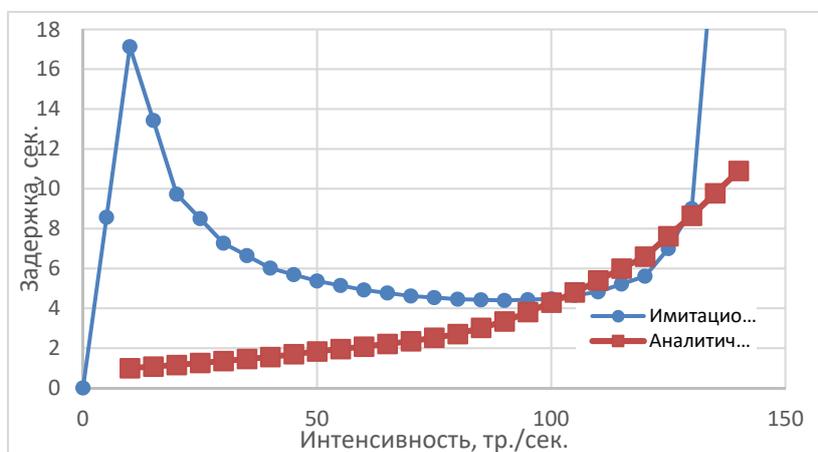


Рисунок 4 – Зависимость задержки от интенсивности формирования транзакций

В четвертой главе был представлен алгоритм по выбору блокчейн-системы и алгоритма консенсуса на основе требований и предпочтений. Его использование позволило провести предварительную оценку использования технологий блокчейна для интеграции в перспективное решение.

Также была представлена методика по внедрению и настройке различных параметров блокчейна для обеспечения предоставленных требуемого качества услуг на сетях связи. Представленная методика необходима для того, чтобы можно было заранее подобрать параметры блокчейна в зависимости от конкретного контекста и оценить необходимые инфраструктурные изменения для удовлетворения необходимых показателей. На рисунке 5 (см. ниже) представлена методика по внедрению и настройке различных параметров блокчейна с учётом моделей, рекомендаций и результатов, полученных в главе 3.



Рисунок 5 – Методика по внедрению и настройке различных параметров блокчейна

На основании проведенных аналитического, имитационного моделирования и экспериментов были предложены рекомендации для оператора связи с целью обеспечения заданного качества услуг.

В качестве примера были приведены рекомендации по внедрению блокчейн решения в одну из перспективных технологий, такую как V2X. Представленное решение позволило повысить конфиденциальность и надежность передаваемых данных, обеспечить появление новых возможностей по принятию решений и показали теоретическую возможность снизить задержки на 39% и повысить энергоэффективность на 36%.

В заключении обозначены цель работы и, полученные в ходе исследований, научные результаты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Целью диссертационной работы является разработка модели и методов применения систем распределённого реестра, необходимых для обеспечения требуемых показателей качества услуг, а также стабильности состояния элементов сети.

Основные результаты, полученные в ходе диссертационной работы:

1. Представлены показатели сетевых характеристик и системных параметров с их зависимостями, необходимые для прогнозирования поведения системы;

2. Разработана аналитическая модель, моделирующая работу фрагмента сети, позволяющая провести оценку задержки пакетов и других сетевых характеристик;

3. Разработан и настроен стенд сети блокчейн, приведено описание ключевых результатов эксперимента, в рамках которого проводился анализ трафика, представлены зависимость распределения числа пакетов от их размера и зависимость плотности распределения временных интервалов между пакетами. Были проведены эксперименты при различных выделенных мощностях. Эксперимент показал, что для корректной работы технологии блокчейн представленного типа необходимо выделять не менее 2 Гб оперативной памяти

для каждого узла. Чем меньше узлам было выделено ресурсов системы, тем меньше была пропускная способность системы при работе блокчейн;

4. На базе полученных аналитических данных были разработаны имитационные модели. Созданные имитационные модели системы блокчейн и сети с внедрением трафика блокчейн приложений, включающие обобщенную модель трафика и учитывающие свойства процессов подсистемы. Предложенные модели представляют средства для выявления многих важных показателей, таких как интенсивность появления транзакций в секунду, размер блоков, время обработки блоков валидаторами, влияющие на определенные характеристики, например, время ожидания в пуле памяти, время пребывания пакетов в системе, задержка транзакций и другие;

5. Представлены результаты сравнения моделей и результаты влияния изменения настроек системы. При проведении моделирования было отмечено влияние интенсивности появления транзакций на размер пула памяти, при котором увеличение интенсивности приводило к увеличению числа транзакций, ожидающих включения в блок. Результаты влияния интенсивности формирования транзакций на задержку показали, что при низком значении, либо при превышении определенных значений и при фиксированном размере блока, средняя задержка возрастает. Изменение размера блока также влияет на задержку транзакции, так при малых размерах блока средняя задержка чрезвычайно высока и постепенно уменьшается по мере увеличения размера блока, однако при превышении определенных значений снова начинается рост средней задержки. При проведении моделирования было отмечено влияние времени обработки блока валидатором на задержку, при увеличении которого средняя задержка возрастает по линейной зависимости до момента пока время обработки не достигнет 2 секунды, после чего среднее значение задержки начинает резко увеличиваться;

6. Разработан алгоритм по выбору блокчейн-системы и алгоритма консенсуса на основе требований и предпочтений. Его использование позволило провести предварительную оценку использования технологий блокчейна для интеграции в перспективное решение;

7. Представлена методика по внедрению и настройке различных параметров блокчейна для обеспечения предоставленных требуемого качества

услуг на сетях связи. Представленная методика необходима для того, чтобы можно было заранее подобрать параметры блокчейна в зависимости от конкретного контекста и оценить необходимые инфраструктурные изменения для удовлетворения необходимых показателей;

8. Приведены рекомендации по внедрению блокчейн решения в одну из перспективных технологий, такую как V2X. Представленное решение позволило повысить конфиденциальность и надежность передаваемых данных, обеспечить появление новых возможностей по принятию решений и показали теоретическую возможность снизить задержки на 39% и повысить энергоэффективность на 36%.

Таким образом, достигнутые результаты свидетельствуют о полном выполнении целей задач диссертационной работы.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях, включенных в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованный ВАК

1. Спиркина, А.В. Научные аспекты структурно-параметрического моделирования блокчейн-систем / А.В. Спиркина // Труды учебных заведений связи. – 2021. – Т. 7. – №. 1.
2. Spirkina, A.V. Development and analysis of a blockchain system based on JavaScript / V.S. Elagin, V.I. Fedorovskikh, A.V. Spirkina // Т-Comm-Телекоммуникации и Транспорт.– 2021. – Т.15. – №. 2. – С. 40-45.
3. Спиркина, А.В. Основные сетевые характеристики Blockchain трафика и подходы к моделированию / В.С. Елагин, А.В. Спиркина, А.Г. Владыко Е.И. Иванов, А.В. Помогалова // Т-Comm – Телекоммуникации и Транспорт. – 2020. – № 4. – С. 39-45.
4. Спиркина, А.В. Сетевые аспекты применения технологии Blockchain / Б.С. Гольдштейн, В.С. Елагин, А.В. Онуфриенко, И.А. Белозерцев // Вестник связи. – 2019. – №. 4. – С. 12-17.
5. Онуфриенко, А.В. Модели обеспечения QOE для OTT сервисов / В.С. Елагин, И.А. Белозерцев, А.В. Онуфриенко // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2019. – Т. 13. – № 4. – С. 9-14.

6. Онуфриенко, А.В. Эффективность DPI-системы для идентификации трафика и обеспечения качества обслуживания OTT-сервисов / В.С. Елагин, А.В. Онуфриенко, А.А. Зарубин // Научные технологии в космических исследованиях Земли. – 2018. – Т. 10. – № 3. – С. 40-53.

Результаты интеллектуальной деятельности

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ Программная модель системы анализа и визуализации данных при работе технологии блокчейн / А.В. Спиркина – No 2022617101; заявл. 05.04.2022; зарег. 18.04.2022. – 332 байт.

Статьи, опубликованные в изданиях, включенных в международные базы цитирования

8. Spirkina, A.V. Distributed Edge Computing with Blockchain Technology to Enable Ultra-Reliable Low-Latency V2X Communications / A. Vladyko, V. Elagin, A. Spirkina, A. Muthanna, A.A. Ateya // Electronics. – 2022. – Т. 11. – №. 2. – P. 173.

9. Spirkina, A. Towards Practical Applications in Modeling Blockchain System / A. Vladyko, A. Spirkina, V. Elagin // Future Internet. – 2021. – № 13. – P. 125.

10. Spirkina, A. V2X-based intersection priority management / M. Buinevich, A. Spirkina, V. Elagin, S. Tarakanov, A. Vladyko // 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Conference Proceedings. – 2021. – P. 9416016.

11. Spirkina, A.V. Evaluation of the impact the hyper-converged infrastructure storage subsystem synchronization on the overall performance / A.A. Shvidkiy, A.V. Spirkina, A.A. Savelieva, A.V. Tarlykov // 2020 12th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). – 2020. – P. 248-252.

12. Spirkina, A.V. Providing QoS for OTT services in communication networks / A.B. Goldstein, I.A. Belozertsev, V.S. Elagin, A.V. Spirkina // 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. – 2020. – P. 9078633.

13. Spirkina, A. Technological aspects of blockchain application for vehicle-to-network / V. Elagin, A. Spirkina, M. Buinevich, A. Vladyko // Information. – 2020. – №. 10. – P. 465.

14. Spirkina, A.V. Blockchain Models to Improve the Service Security on Board Communications / A.G. Vladyko, A.V. Spirkina, V.S. Elagin, I.A. Belozertsev, E.A. Aptrieva // 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. – P. 1-6.

15. Spirkina, A. Blockchain Behavioral Traffic Model as a Tool to Influence Service IT Security / V. Elagin, A. Spirkina, A. Levakov, I. Belozertsev // Future Internet. – 2020. – № 12. – P. 68.

16. Spirkina, A.V. Approaches to Modeling Blockchain Systems / A.V. Spirkina, E.A. Aptrieva, V.S. Elagin, A.A. Shvidkiy, A.A. Savelieva // 2020 12th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT). – 2020. – P. 242-247.

17. Spirkina, A.V. Network characteristics of blockchain technology of on board communication / A.B. Goldstein, N.A. Sokolov, V.S. Elagin, A.V. Onufrienko, I.A. Belozertsev // 2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. – 2019. – P. 1-5.

18. Spirkina, A.V. Models of QOE Ensuring for OTT Services / V.S. Elagin, I.A. Belozertsev, B.S. Goldshtein, A.V. Onufrienko, A.G. Vladyko // 2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. – 2019. – P. 8706748.725

19. Spirkina, A.V. On the application of game theory for multiagent system-based cognitive performance management in software-defined networks / B.S. Goldshtein, V.S. Elagin, C.D. Nguyen, A.V. Onufrienko // 11th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops. – 2019. – P. 8970858.

20. Spirkina, A.V. The efficiency of the dpi system for identifying traffic and providing the quality of OTT services / V.S. Elagin., B.S. Goldshtein, A.V. Onufrienko, A.A. Zarubin, A.A. Savelieva // 2018 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. – 2018. – P. 8350589.

21. Spirkina, A.V. Synchronization of delay for OTT services in LTE / A.B. Goldstein, A.A. Zarubin, A.V. Onufrienko, V.S. Elagin, I.A. Belozertsev // 2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications. – 2018. – P. 8456944.

22. Spirkina, A.V. Modeling OTT services in multiservice networks in order to synchronize and prioritize traffic / V.S. Elagin, B.S. Goldshtein, A.V. Onufrienko, I.A. Belozertsev, A.A. Savelieva // 2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO 2018. – 2018. – P. 8456968.

**Научные статьи, опубликованные в других изданиях
и сборниках научных конференций**

23. Спиркина, А.В. Фундаментальные основы моделирования трафика в гетерогенных сетях связи, с перспективой канальной идентификации отдельных сервисов и прогнозирования состояния сети / В.С. Елагин, А.В. Спиркина,

В.В. Фицов // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2021). X Международная научно-техническая и научно-методическая конференция, в 4 т.: сборник научных статей. Санкт-Петербург, 2021. – С. 351-356.

24. Спиркина, А.В. Настройка стенда для анализа сетевых характеристик blockchain систем / Аптриева Е.А., В.С. Елагин, А.В. Спиркина // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2020). IX Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сборник научных статей, Санкт-Петербург, 26–27 февраля 2020 года. – СПб.: СПбГУТ, 2020. – С. 98-103.

25. Спиркина, А.В. Влияние технологии blockchain на вероятностно-временные характеристики сети / И.А. Белозерцев, В.С. Елагин, А.В. Спиркина // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2019). VIII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сборник научных статей в 4 т., Санкт-Петербург, 27–28 февраля 2019 года. – СПб.: СПбГУТ, 2019. – С. 127-132.

26. Онуфриенко, А.В. Интеграция технологии распределённого реестра в сети пятого поколения / В.С. Елагин, И.А. Белозерцев, А.В. Онуфриенко, М.В. Николаева // Модернизация информационной инфраструктуры для сетей 5G/ИМТ 2020 и для других перспективных технологий в интересах трансформации регионов РОСИНФОКОМ-2019. – 2019. – С.63-69.

Отчёты о НИР

27. Спиркина А.В., Елагин В.С. Отчёт о научно-исследовательской работе «Исследование характеристик сети при работе с технологией распределённых реестров» (промежуточный). Российский фонд фундаментальных исследований. 2021. 38 с.

28. Спиркина А.В., Елагин В.С. Отчёт о научно-исследовательской работе «Исследование характеристик сети при работе с технологией распределённых реестров» (заключительный). Российский фонд фундаментальных исследований. 2021. 41 с.

29. Владыко А.Г., Елагин В.С., Спиркина А.В., и др. Отчёт о научно-исследовательской работе «Разработка экспериментального образца аппаратно-программной платформы предоставления приоритетного проезда регулируемых перекрестков для общественного, грузового и специального транспорта» (Этап 3. Теоритические и экспериментальные исследования конструкторско-технологических

и программных решений). Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации. 2021. 471 с.

30. Шестаков А.В., Кучерявый А.Е., Елагин В.С., Спиркина А.В., и др. Отчёт о научно-исследовательской работе «Прикладные научные исследования в области создания сетей связи 2030, включая услуги телеприсутствия с сетевой поддержкой, и экспериментальная проверка решений при подготовке отраслевых кадров». Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации. 2021. 590 с.

31. Владыко А.Г., Елагин В.С., Спиркина А.В., и др. Отчёт о научно-исследовательской работе «Разработка экспериментального образца аппаратно-программной платформы предоставления приоритетного проезда регулируемых перекрестков для общественного, грузового и специального транспорта» (Этап 1. Выбор направлений исследований). Федеральное агентство связи. 2020. 290 с.

32. Владыко А.Г., Елагин В.С., Спиркина А.В., и др. Отчёт о научно-исследовательской работе «Разработка экспериментального образца аппаратно-программной платформы предоставления приоритетного проезда регулируемых перекрестков для общественного, грузового и специального транспорта» (Этап 2. Теоретические и экспериментальные исследования системотехнических решений). Федеральное агентство связи. 2020. 304 с.