

На правах рукописи

Помогалова Альбина Владимировна

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ
АДАПТИВНОГО ВЫБОРА БЛОКЧЕЙН-СИСТЕМ С УЧЕТОМ
ХАРАКТЕРИСТИК ТРАФИКА В СЕТЯХ СВЯЗИ**

2.2.15. Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2025

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: **Колбанёв Михаил Олегович,**
доктор технических наук, профессор,
Санкт-Петербургский государственный
экономический университет, кафедра
информационных систем и технологий, профессор
кафедры

Степанов Михаил Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент,
Московский технический университет связи и
информатики, кафедра сетей связи и систем
коммутации, доцент кафедры

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики»,
г. Самара

Защита состоится 26 марта 2025 года в 15.00 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 24 января 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 55.2.004.01,
канд. техн. наук, доцент

А.Г. Владыко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В условиях непрерывного развития информационных технологий, способствующих созданию сложных вычислительных систем, ключевую роль для обеспечения отказоустойчивости и стабильности функционирования играют сети связи передачи данных. Многие компоненты современных информационных систем генерируют собственный поток информации, требующий обработки и распространения среди других устройств по сети, что ведет к необходимости выделения приоритетного трафика, балансировки и учета промежутков пиковой нагрузки. Большое внимание уделяется обеспечению безопасности и прозрачности ряда действий в информационных системах, с целью контроля инцидентов, потенциальных угроз злоумышленников, а также гарантий сохранности данных в неизменяемом виде или фиксации даты и объема этих изменений.

Технология блокчейн позволяет удовлетворить многие из требований к безопасным и устойчивым системам работы с данными, но в подавляющем ряде случаев требует излишних вычислительных и сетевых ресурсов, обеспечение которых является критическим при использовании вариаций с многими алгоритмами консенсуса. Отсутствие гибкости при передаче блокчейн-трафика является одной из ключевых причин отказа от ее внедрения. Система регуляции объемов и скорости генерации трафика блокчейн позволила бы обеспечить требуемую гибкость для всех случаев – чаще, когда трафик блокчейн является не приоритетным, реже, когда является приоритетным, что зависит от конечных целей и реализации. Учитывая, что установка клиента блокчейн на компоненты сети связи будет оказывать ощутимое влияние на оборудование и скорость обработки данных, регуляция алгоритмов консенсуса в процессе обработки данных с учетом сетевых и вычислительных параметров позволит гибко принимать решение о возможности использования наиболее ресурсоемкого алгоритма и переключаться на менее ресурсоемкий в моменты пиковых нагрузок.

Степень разработанности темы. Область применения и интеграции технологии блокчейн, ее влияние на сетевые характеристики систем, вопросы применимости рассматриваются в работах отечественных и зарубежных ученых К.Е. Самуйлова, Р.В. Киричка, Б.С. Гольдштейна, А.Е. Кучерявого, А.Г. Владыко, Е.А. Кучерявого, В.Л. Достова, В.С. Елагина, В.В. Корхова, V. Buterin, S. Kasahara, Q. Xia, Y. Sun, L. Cocco, и др.

Многие работы посвящены исследованию вопросов распространения трафика по сети, влияние на сетевые характеристики, рассмотрению вопросов технической зрелости подхода для интеграции в существующие системы, а также аспекты

безопасности технологии. Представлен ряд научных работ, посвященных оптимизации на основе исследований алгоритмов консенсуса, однако, проблема адаптации этих алгоритмов к условиям телекоммуникационных сетей остается недостаточно изученной, в особенности с точки зрения представления адаптивного алгоритма выбора консенсуса блокчейна на сетях связи, как альтернатива разработке универсального алгоритма консенсуса.

Представленная диссертационная работа дополняет приведенные авторами исследования, раскрывая аспекты интеграции адаптивного выбора алгоритмов консенсуса блокчейн на сетях связи, учитывая сетевые и аппаратные характеристики. При этом решается **научная задача** по разработке модели и методики оценки эффективности адаптивного выбора блокчейн-систем для снижения потерь блоков транзакций на сетях связи и обеспечения достаточного уровня гибкости управления.

Работа фокусируется на адаптивности при выборе алгоритма консенсуса, влиянии концепции на потерях блоков транзакций, разработке модели и методики интеграции модуля принятия решения адаптивного выбора блокчейн-систем. Полученные результаты могут служить основой при формировании систем динамического подбора алгоритма консенсуса участка сети в зависимости от сетевых характеристик, внося значительный вклад в область исследования вопросов интеграции блокчейн в современные сети связи.

Объектом исследования являются телекоммуникационные сети и системы связи, использующие технологию блокчейн. **Предметом исследования** являются временные характеристики телекоммуникационных систем и сетей связи в условиях применения на них блокчейн-систем.

Цель диссертационного исследования заключается в снижении коэффициента потери блоков транзакций на сетях связи за счет применения нового алгоритма адаптации консенсуса и частоты генерации блоков транзакций к сетевым характеристикам на сетях связи.

Для достижения этой цели поставлены следующие **задачи**:

- анализ структуры сетевых пакетов блокчейн-трафика и оценка его влияния на сети связи;
- анализ влияния блокчейн-систем на аппаратные компоненты оборудования;
- анализ существующих блокчейн алгоритмов консенсуса, включая их преимущества и недостатки, с целью выявления ограничений при применении в телекоммуникационных сетях;
- выявление граничных значений сетевых и аппаратных характеристик наибольшей эффективности рассматриваемых алгоритмов консенсуса;

- разработка модели модуля принятия решения выбора блокчейн-систем на сетях связи, учитывая специфику телекоммуникационных сетей, включая их топологию, пропускную способность, задержки и энергопотребление, расположение модуля в их архитектуре;
- разработка модели оценки эффективности модуля принятия решения по адаптивному выбору блокчейн-консенсуса с учетом сетевых характеристик;
- проведение аналитических расчетов и имитационного моделирования оценки процента расхождения;
- разработка адаптивного алгоритма выбора консенсуса блокчейн-сети с учетом значений сетевых характеристик, как ключевого компонента модуля принятия решения;
- анализ и сравнение результатов аналитических расчетов, имитационного и экспериментального моделирования для тестирования разработанного модуля принятия решения в реальных условиях. Оценка его производительности, надежности и безопасности в различных сценариях использования;
- разработка методики интеграции разработанного модуля принятия решения в различные телекоммуникационные системы и сети. Описание возможных сценариев применения и их преимуществ для операторов и разработчиков телекоммуникационного оборудования;
- разработка методики оценки эффективности разработанного модуля принятия решения с учетом параметров и конфигурации сети связи.

Научная новизна

1) Впервые предложены изменяемые компоненты технологии блокчейн и представлены результаты влияния на сеть связи изменения предлагаемых параметров. Выделены и определены пороговые значения сетевых характеристик наибольшей эффективности алгоритмов консенсуса.

2) Впервые предложен подход адаптивного выбора алгоритма консенсуса технологии блокчейн, в отличие от применяемого в современных исследованиях концепта разработки универсального алгоритма консенсуса, как основа модуля принятия решения. Предложенное математическое описание системы массового обслуживания с модулем принятия решения и смены консенсуса является впервые представленным математическим описанием концепции изменения правил блокчейна в зависимости от сетевых требований в момент времени.

3) Проведена апробация адаптивного выбора алгоритма консенсуса технологии блокчейн в рамках имитационного моделирования и исследование параметров потерь блоков данных при его использовании в отличие от неизменяемого алгоритма консенсуса с изменяемым параметром сложности системы.

Теоретическая значимость исследования заключается в анализе влияния сетевого трафика блокчейн-систем на современные сети связи и модель его распространения. Ценность представлена результатами исследования потерь блоков при адаптации алгоритмов консенсуса под сетевые и аппаратные характеристики. Разработанная модель модуля принятия решения позволяет качественно управлять блокчейн-трафиком и оперировать сетевыми характеристиками для повышения уровня целостности блокчейн трафика при изменении уровня нагрузки на канал связи. Модель массового обслуживания системы может быть использована для аналитического представления вероятностных исходов состояний сети под влиянием адаптивного выбора алгоритма консенсуса блокчейн-сети.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в разработке методик оценки эффективности и интеграции модуля принятия решения адаптивного выбора блокчейн-систем для управления информационными потоками блокчейн на сетях связи, для более эффективной регуляции блокчейн-трафика, оптимизации использования сетевых ресурсов и снижения энергопотребления. Рекомендации по оценке эффективности и интеграции модуля принятия решения могут быть полезны для разработчиков и операторов телекоммуникационных сетей при интеграции блокчейн-технологий в различные системы.

Полученные в диссертации результаты использованы в ООО «Естественный Интеллект» при разработке корпоративного программного решения – платформы обмена сообщениями компании «NIM: Native Intelligence Messenger» с интегрированным слоем блокчейн-сети и сервисами искусственного интеллекта, в ООО «ЮбиТел» при проектировании программного обеспечения «Моделирование сетей 3GPP/IEEE системного уровня с интегрированными библиотеками для построения систем искусственного интеллекта», в ФГБОУ ВО СПбГУТ при чтении лекций и проведении практических занятий по курсу «Сети связи и системы коммутации», а также при выполнении ПНИ и отчета о НИР на тему «Прикладные научные исследования в области создания, развития и нормативного регулирования сетей связи, цифровых и перспективных технологий, подготовки отраслевых кадров на период до 2030 года с учетом импортозамещения и необходимости преодоления санкционных ограничений», дата начала 01.01.2024, дата окончания 31.12.2024, при выполнении ПНИ и отчета о НИР на тему «Прикладные научные исследования в области создания сетей связи 2030, включая услуги телеприсутствия с сетевой поддержкой, и экспериментальная проверка решений при подготовке отраслевых кадров», дата начала 19.01.2023, дата окончания 29.12.2023, номер государственной регистрации: 123060900012-6.

Методология и методы исследования. В диссертационном исследовании использовались методы теории телетрафика и теории массового обслуживания, теории вероятностей, математической статистики, а также методах аналитического и имитационного моделирования событийных систем. Имитационное моделирование разработанного адаптивного алгоритма выполнено с использованием программного обеспечения Python, Kotlin, Anylogic.

Положения, выносимые на защиту:

1) Число сетевых характеристик для эффективного выбора блокчейн-систем в сетях связи не превышает десяти штук с учетом реальных диапазонов их пороговых значений.

2) Модель модуля принятия решения по выбору блокчейн-систем для снижения числа потерянных блоков транзакций показывает точность расчета с погрешностью не более 5% в сравнении с результатами имитационного моделирования.

3) Методика интеграции модуля принятия решения для адаптивного выбора блокчейн-систем с учетом сетевых характеристик позволяет уменьшить потери блоков не менее 10% относительно существующих блокчейн-систем.

Степень достоверности. Достоверность основных результатов диссертации подтверждается корректным применением математического аппарата, результатами аналитического и имитационного моделирования, обсуждением основных полученных результатов в рамках выступлений как на российских, так и международных конференциях.

Апробация результатов диссертационного исследования. Положения, выносимые на защиту, были представлены и обсуждались на научных конференциях и семинарах: 24-й международной конференции «Distributed Computer and Communication Networks: Control, Computation, Communications», международной научной конференции «2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications», 4-й международной научно-технической конференции «Современные сетевые технологии», международной научной конференции «2022 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex», 2-й международной конференции «International Conference on Advanced Computing & Next-Generation Communication, международной конференции «2024 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications», МНТК «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании», семинарах кафедры инфокоммуникационных систем.

Публикации по теме диссертации. Материалы работы изложены в полной мере в 17 публикациях, из них: 4 статьи в изданиях, включенных в перечень рецензируемых научных изданиях (перечень ВАК при Минобрнауки России); 4 статьи в изданиях,

включенных в международные базы цитирования; 3 результата интеллектуальной деятельности; 2 отчёта о НИР; 4 статьи в других изданиях и материалах конференций.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа выполнена по специальности 2.2.15 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций и соответствует следующим пунктам паспорта специальности: 1, 4, 13.

Личный вклад автора. Все основные результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно. Экспериментальные исследования проведены при его непосредственном участии и под научным руководством.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и 2 приложений. Общий объем диссертации 144 страницы, включая 38 рисунков, 5 таблиц, список литературы из 82 наименований. В приложении к диссертационной работе приведены документы, подтверждающие внедрение основных результатов диссертационной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования и определены её ключевые особенности, сформулированы цель и задачи работы, определена научная новизна результатов, указаны теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены сведения об апробации работы, перечислены публикации по теме выполненного исследования, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена исследованию роли блокчейн-трафика в современных сетях связи, а также детальному анализу его характеристик и влияния на производительность сетевой инфраструктуры.

В первой части главы рассматриваются основные компоненты технологии блокчейн, такие как узлы, блоки, транзакции и алгоритмы консенсуса. Рассматривается архитектура сети блокчейн, включая описание различных типов узлов, таких как полные узлы, легкие узлы, майнинг-узлы и узлы-валидаторы, а также их функции. Приводится анализ применимости блокчейн-технологий на международном уровне и в России, с примерами успешной интеграции в различные отрасли, включая финансы, здравоохранение, логистику и государственное управление. Рассматривается общий принцип работы блокчейна, включая процесс формирования и валидации транзакций, а также механизм добавления новых блоков.

Во второй части главы проводится анализ структуры сетевого пакета блокчейн-сетей Ethereum, TON и Cardano, как наиболее популярных и отличающихся механиками работы, а также принципом организации. Проводится захват и анализ сетевого трафика, что позволяет выявить особенности передачи данных в блокчейн-сетях и оценить их влияние на полосу пропускания. Описываются результаты исследования, включая размеры блоков и транзакций, а также количество пакетов, необходимых для передачи информации, результаты приведены в Таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение сетевой нагрузки и характеристик сетевых пакетов блокчейнов Ethereum, TON, Cardano

	Ethereum	TON	Cardano
Размер блока макс. (Мбайт)	12	2	0,08
Размер транзакции макс. (Кбайт)	780	64	16
Среднее время создания блока (с)	15	5	20

Продолжение Таблицы 1

	Ethereum	TON	Cardano
Общий размер (полезной) нагрузки для транзакции (Байт)	1500 (1348)	1500 (1422)	2962 (2896)
Общий размер (полезной) нагрузки для блока (Байт)	1500 (1348)	1500 (1446)	2962 (2896)
% пакета под полезную нагрузку транзакции	90	94,8	97
% пакета под полезную нагрузку блока	90	96	97
Сетевая нагрузка при передаче блоков (пакетов на 1 блок)	9335	1450	32
Сетевая нагрузка при передаче блоков (пакетов/с)	623	290	1,5
Предельная сетевая нагрузка при передаче блоков (Мбит/с)	7,476	3,48	0,04

Глава завершается выводами о проведенном исследовании и его значении для понимания особенностей блокчейн-трафика и его влияния на производительность современных сетей связи.

Во второй главе рассмотрено влияние алгоритмов консенсуса на сети связи. Приводится понятие алгоритма консенсуса, его значение для блокчейн-сетей, разновидности с категоризацией на алгоритмы византийской отказоустойчивости (5 алгоритмов), доказательство доли владения и подобные алгоритмы (6 алгоритмов),

доказательство выполненной работы и подобные алгоритмы (4 алгоритма), альтернативные алгоритмы с уникальными механиками (2 алгоритма).

Так как консенсусы во многом повторяют основную механику за исключением некоторых оптимизаций, определяется выбор следующих алгоритмов консенсуса для дальнейшего рассмотрения: PoW, PoS, DPoS, PBFT, PoR, PoA, PoET, FBA. Эти алгоритмы реализуют ключевые механики из трех категорий. Категория альтернативных алгоритмов не учитывалась, так как механизмы внутри алгоритмов практически не приспособлены к среднестатистическим действиям в блокчейне и специализируются на конкретных частных и редких задачах.

Также во второй главе описывается исследование влияния компонентов блокчейн сети на аппаратное обеспечение, в рамках которого оценивается нагрузка на центральный процессор, оперативную память и жесткий диск.

По результатам эксперимента сделаны выводы, что учет аппаратной нагрузки является необходимым, так как вычислительные затраты могут оказывать значительное влияние, а также замедлять процесс обработки других сетевых пакетов, не связанных с работой блокчейн-сети.

На Рисунке 1 приводится предполагаемая архитектура интеграции предлагаемых модуля мониторинга сетевых характеристик и модуля принятия решений для адаптивного выбора консенсуса блокчейн-сети с вариантом расположения узлов непосредственно на сетевом оборудовании. Для этого в работе был проведен анализ аппаратных характеристик разных моделей маршрутизаторов и коммутаторов в сравнении с официальными требованиями наиболее популярного блокчейн-узла с открытым исходным кодом Ethereum к аппаратному обеспечению для его запуска (имеется в виду запуск узла главной сети, предполагающий синхронизацию полного объема данных и дальнейшую обработку транзакций сети, и создание блоков).

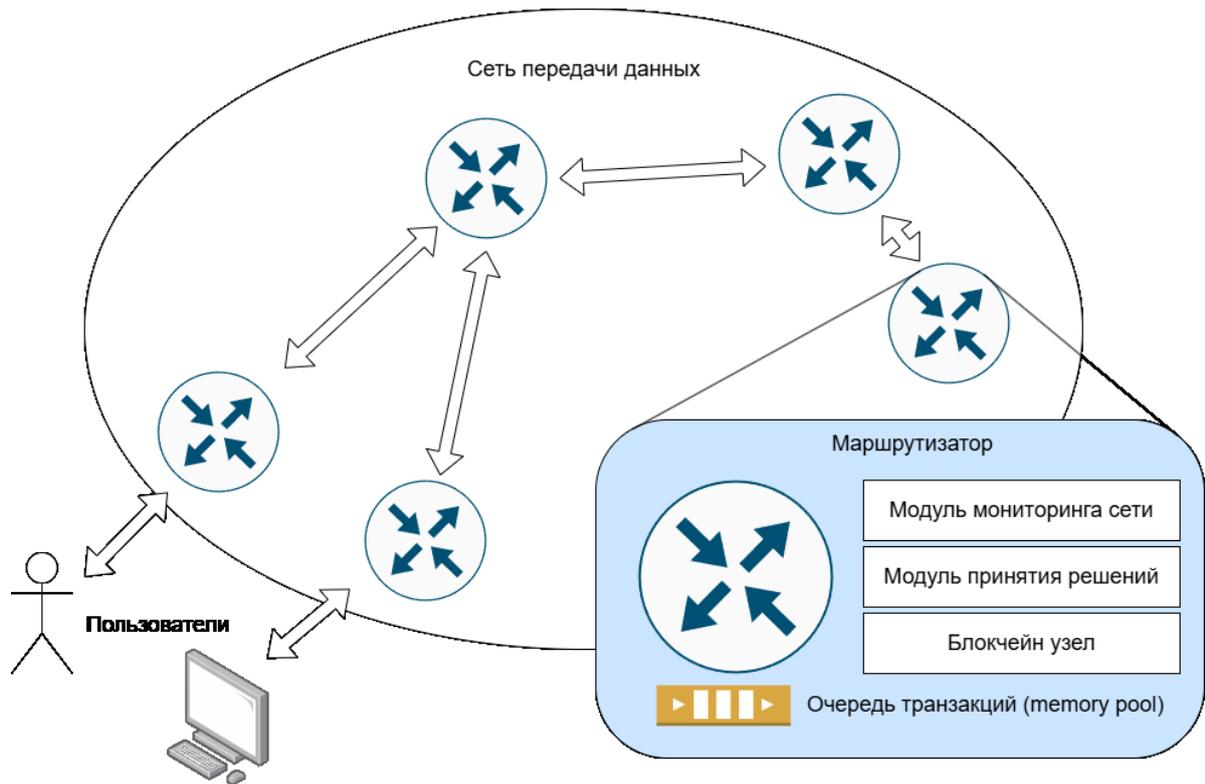


Рисунок 1 – Архитектура сети связи с интегрированным слоем блокчейн и модулем адаптивного алгоритма

Во второй части второй главы представлены результаты проведенного исследования возможности использования блокчейн-сетей для записи и чтения данных на примере фиксации информации об оплате платного участка дорожно-транспортной развязки. Для разработки модельного стенда и проведения дальнейшего исследования использованы две блокчейн-платформы – Ethereum, работающий на базе алгоритма Proof of Work (PoW) и Waves, работающий на базе алгоритма Leased Proof of Stake (LPoS). В связи с особенностями работы частных экземпляров сети рассматриваемых платформ организовано два модельных стенда. Ключевым отличием данных блокчейн-платформ являются лежащие в основе алгоритмы консенсуса, что сказывается на производительности блокчейн-сети, ее защищенности, а также аппаратных требованиях к узлу организуемой сети.

На Рисунке 2 (А) демонстрируются результаты алгоритма PoW, отмечается длительное время обработки транзакции, потери в размере 14,9% от общего количества. В случае же записи данных при использовании консенсуса LPoS потери при записи транзакций в блокчейн-сеть отсутствуют. На Рисунке 2 (В) показано, что скорость записи транзакций в 20 – 40 раз выше, чем при использовании PoW.

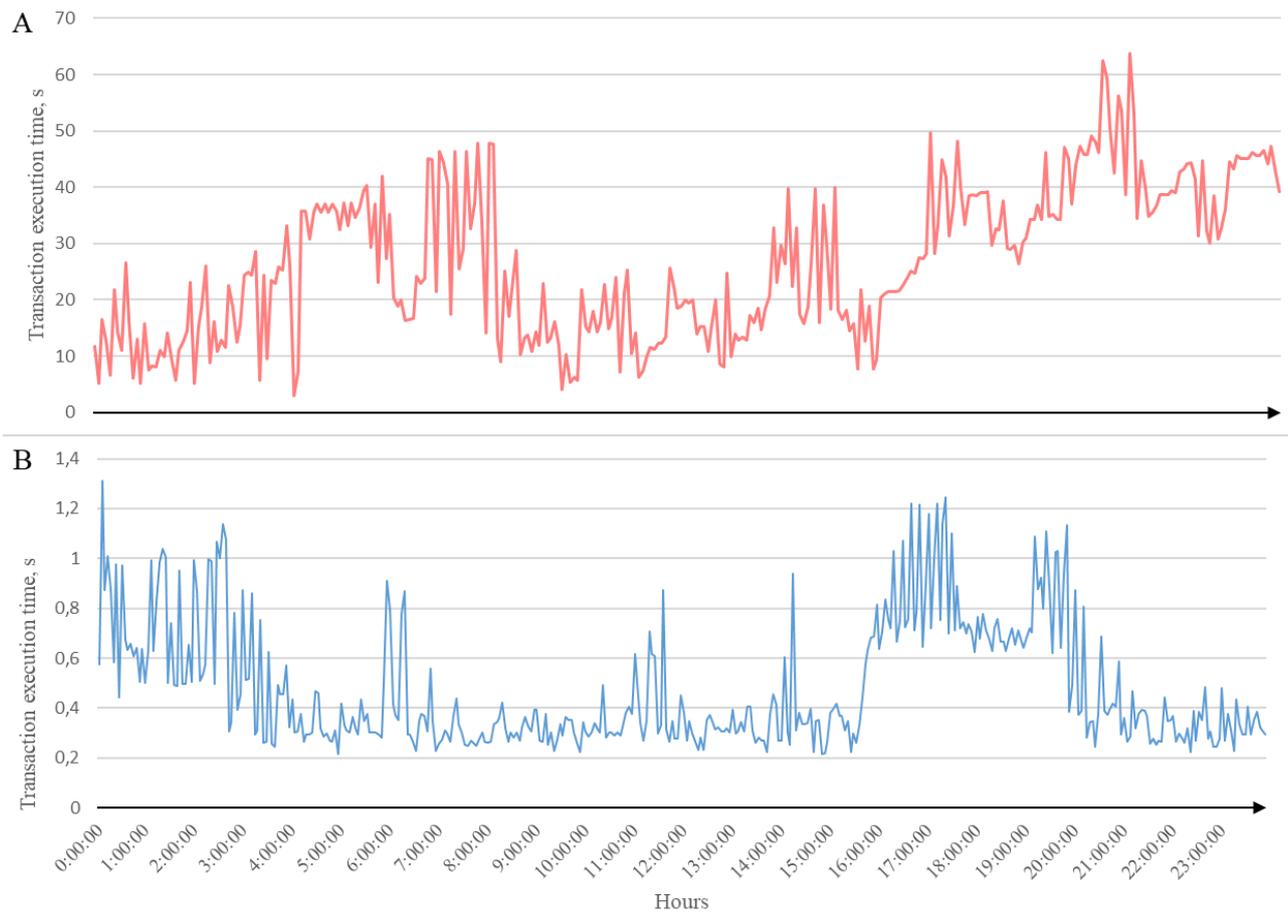


Рисунок 2 – Время обработки транзакции
(А – в случае сети Ethereum, В – в случае сети Waves)

Проведенное исследование демонстрирует возможность интеграции и применения технологии блокчейн в концепции интеллектуальной транспортной сети. Полученные результаты подтверждают необходимость балансировки в зависимости от текущих сетевых условий, так как на приведенных графиках видны периоды эффективности каждого из алгоритмов. Реализация адаптивного алгоритма для информационных блокчейн-поток позволила бы эффективно записывать информацию, а также балансировать нагрузку на аппаратное обеспечение.

С помощью проведенных моделирований и значений, полученных экспериментальным путем в рамках исследования влияния на аппаратные компоненты, а также сетевые характеристики, рассмотренные во второй главе, сформирована таблица диапазонов допустимых граничных значений, при которых алгоритмы работают наиболее эффективно. Значения представлены в Таблице 2.

Таблица 2 – Диапазоны сетевых характеристик канала связи эффективности работы алгоритмов консенсуса, выявленные экспериментальным путем

Алгоритм	PoW	PoS	DPoS	PBFT	PoR	PoA	PoET	FBA
Пропускная способность (B), Мбит/с	10–100	5–50	5–50	10–100	10–100	10–100	10–100	10–100
Задержка (L), мс	100–200	50–100	50–150	50–100	50–100	50–120	100–200	50–150
Джиттер (J), мс	10–30	10–20	10–30	5–15	5–15	10–30	20–50	10–20
Размер блока (St), КБ	500–2000	250–500	250–1000	100–1000	100–1000	500–2000	500–1000	100–1000
Частота транзакций (ft), транзакций/с	1–10	1–10	10–50	10–50	10–50	5–30	5–30	5–20
Частота генерации 1 блока (Tblock), с	10–30	5–15	5–10	3–10	3–15	10–20	10–15	5–10
Заполненность memory pool (Mpool), %	30–50	30–60	20–40	20–50	20–40	30–50	30–50	20–40
Загрузка CPU, %	60–90	40–70	30–60	50–70	50–80	30–50	40–60	40–70
Использование памяти, МБ	1024–2048	512–1024	256–512	512–1024	512–2048	512–1024	256–512	512–1024
Использование диска, МБ/с	20–50	10–30	5–20	10–30	10–40	10–20	5–20	5–15

В третьей главе представлена модель модуля принятия решения по выбору алгоритма консенсуса блокчейн-сети на основе текущих сетевых характеристик. В предлагаемой концепции каждый узел блокчейн-сети обладает собственным модулем оценки сетевых характеристик, для принятия решения о смене алгоритма консенсуса и корректировки параметров формирования новых блоков данных. Информация об обновлении правил создания и валидации блоков распространяется от узла к другим узлам с целью смены общего алгоритма консенсуса в сети.

Эффективность данного подхода ограничена количеством устройств и их связей, количеством «уровней» передачи информации – чем меньше связей у узла одной и той же сети, тем больше будет этапов передачи информации до границы сети (аналогично

принципам систем с графами), Рисунок 3 демонстрирует принцип распространения информации о необходимости переключения алгоритма консенсуса. Ограничение появляется в связи с функционированием сети во время смены алгоритма консенсуса, так как каждый узел продолжает работу по формированию блоков транзакций. Распространение блока транзакций, сформированного на основе правил алгоритма консенсуса 1, не может быть провалидировано и добавлено в сеть узлом, чей активный алгоритм консенсуса при валидации отличается, что влечет за собой потерю блоков транзакций, и, как следствие, задержку в обработке транзакций.

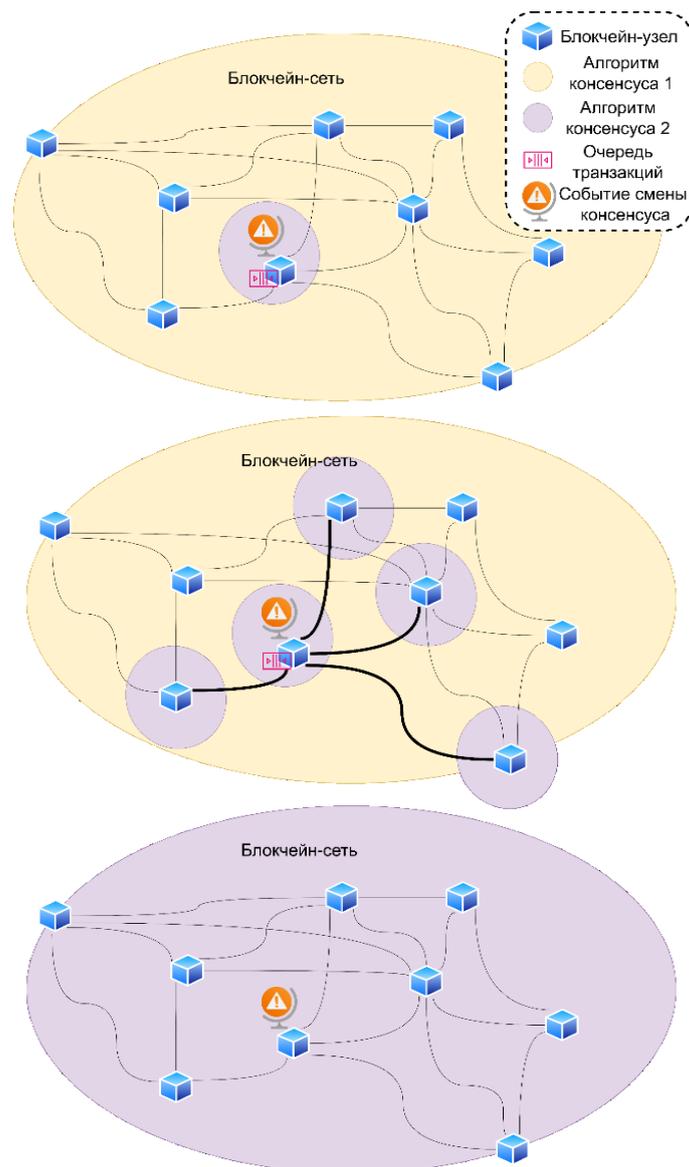
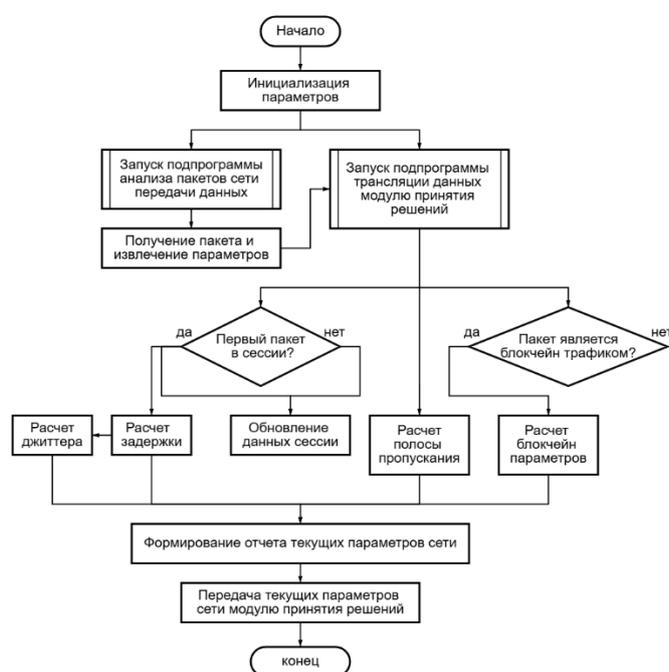


Рисунок 3 – Схема распространения информации о смене алгоритма консенсуса в сети устройств

Как отмечалось на Рисунке 1, система включает в себя модуль мониторинга и модуль принятия решения. Описанный в главе модуль мониторинга отвечает за контроль состояния выделенных характеристик сети, на основе значений которых

далее принимается решение о необходимости смены алгоритма консенсуса в сети. Модуль принятия решения предназначен для адаптивного выбора алгоритма консенсуса в зависимости от текущих условий работы сети. Оптимизация производительности сети достигается путем подбора наиболее подходящего алгоритма консенсуса в ответ на изменения в метриках сети. Алгоритм использует заранее определённую таблицу, в которой указаны условия для каждого алгоритма консенсуса. Эта таблица позволяет определить, какой алгоритм будет наиболее эффективным в текущих условиях. Блок-схемы алгоритма работы каждого из модулей приведены на Рисунке 4 (А, Б).

А



Б

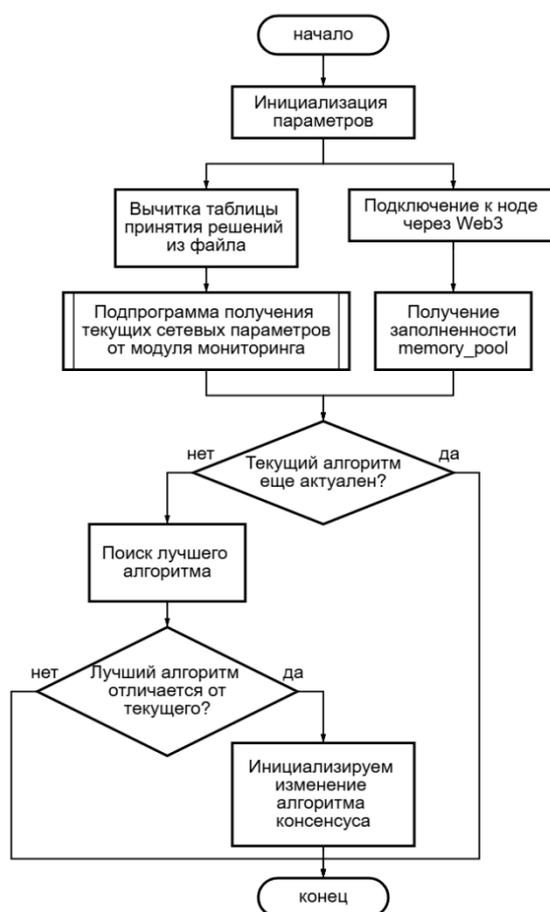


Рисунок 4 – Алгоритм работы модуля мониторинга (А), алгоритм работы модуля принятия решения (Б)

Далее в работе рассматривается аналитическая модель сети связи с блокчейном. Процесс обработки трафика, проходящего через узел блокчейн-сети, представлен в виде многоканальной системы массового обслуживания (СМО) с ограниченными очередями, неоднородным потоком запросов и системой относительных приоритетов.

Рассматривается многоканальная СМО с возможностью отказа. В такой системе запросы поступают в однородном потоке и распределяются между свободными каналами. Если на момент поступления запроса все каналы заняты, он направляется в буфер с ограниченным объемом, при условии, что там есть свободное место. Если же буфер полностью заполнен, запросу отказывают в обслуживании, и он покидает систему необработанным.

В работе проводится расчет вероятности свободного состояния всех каналов в единицу времени. Для этого определено, что $y = \lambda/\mu$ – обслуженные заявки в единицу времени, λ' – абсолютная пропускная способность СМО, $P_{отк}$ – вероятность отказа, $P_{оч}$ – вероятность образования очереди, m – среднее число находящихся в системе заявок, u – среднее время пребывания заявки в системе. Тогда вероятность p_0 , что все каналы n будут находиться в свободном состоянии представлена в формуле (1).

$$p_0 = \left(1 + \frac{y}{1!} + \frac{y^2}{2!} + \dots + \frac{y^n}{n!} + \frac{y^{n+1}}{n \cdot n!} \cdot \frac{1 - \left(\frac{y}{n}\right)^n}{1 - y/n} \right)^{-1} \quad (1)$$

Среднее число заявок, находящихся под обслуживанием $L_{об}$, представлено с помощью формулы (2) как среднее число занятых каналов, т. е. как среднее число обслуживаемых заявок за среднее время обслуживания одной заявки.

$$L_{об} = \bar{k}_{зан} = \lambda' / \mu = y \cdot \left(1 - \frac{y^{n+M}}{n^M \cdot n!} p_0 \right) \quad (2)$$

Среднее число занятых каналов и среднее число заявок, находящихся в очереди $L_{оч}$, представлено выражением в формуле (3).

$$L_{оч} = l = \frac{y^{n+1}}{n \cdot n!} \cdot \frac{1 - \left(\frac{y}{n}\right)^M \left(M + 1 - \frac{M}{n} \cdot y \right)}{\left(1 - \frac{y}{n} \right)^2} \cdot p_0 \quad (3)$$

Для модуля принятия решения адаптивного выбора консенсуса блокчейн-сети основной задачей является регулирование блокчейн трафика для более эффективного использования полосы пропускания. В работе предполагается, что пользовательский трафик является приоритетным, в отличие от блокчейн-трафика. Заявки, ожидающие

обработки, распределяются между несколькими буферами с ограниченной вместимостью. Каждому классу заявок соответствует свой буфер. Для определения порядка обработки используется система относительных приоритетов: в первую очередь обслуживаются заявки с более высоким приоритетом. Если буфер, соответствующий классу поступившего запроса, заполнен, запрос отклоняется.

Среднее время пребывания заявок суммарного потока u рассчитывается по формуле (4).

$$u = \frac{\lambda'_{польз} w'_{польз} + \lambda'_{блок} w'_{блок}}{\lambda'} = \frac{m}{\lambda'} = \frac{\bar{k}_{зан} + l}{\lambda'} = \frac{L_{об} + L_{оч}}{\lambda'} \quad (4)$$

С учетом (4) в работе делается вывод, что регуляция трафика блокчейн напрямую влияет на трафик пользователя, предоставляя больше пространства в случае необходимости и используя незадействованные каналы для обработки очереди блокчейн заявок. Задача адаптивного алгоритма сводится к нахождению оптимального значения $\lambda_{блок}$, и минимизации вероятности отклонения заявки для пользовательского трафика и трафика блокчейн.

В следующей части главы представлена имитационная модель сети с модулем принятия решения адаптивного выбора алгоритма консенсуса блокчейн-сети. С помощью метода имитационного моделирования анализируются ситуации с одинаковыми сетевыми характеристиками, но различающимися алгоритмами консенсуса. Результаты подтвердили необходимость модуля принятия решения для управления нагрузкой в блокчейн-сети при высоком трафике. Результаты представлены на Рисунках 5 и 6.

В результатах отображены низкая эффективность алгоритма PoW при увеличении потока транзакций, потери полезной нагрузки до 30% и увеличение времени подтверждения транзакций. Введение адаптации позволило сети автоматически переключаться с PoW на более эффективный алгоритм Proof of Stake (PoS) в условиях повышенной нагрузки, что значительно снизило задержки и увеличило пропускную способность. При дальнейшем росте была проведена смена алгоритма, обеспечив устойчивую обработку транзакций. Адаптивный подход не только минимизировал потери, но и повысил эффективность использования ресурсов, позволяя обрабатывать транзакции практически без потерь и поддерживать стабильную работу сети.

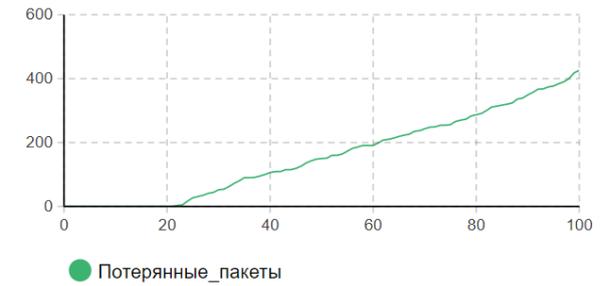
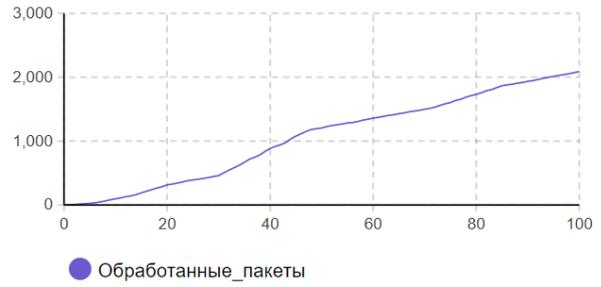
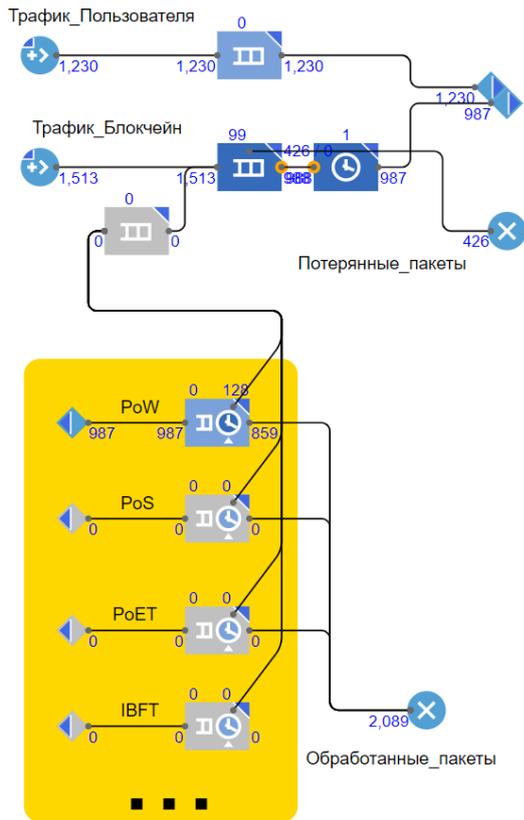


Рисунок 5 – Имитационная модель работы алгоритма консенсуса PoW

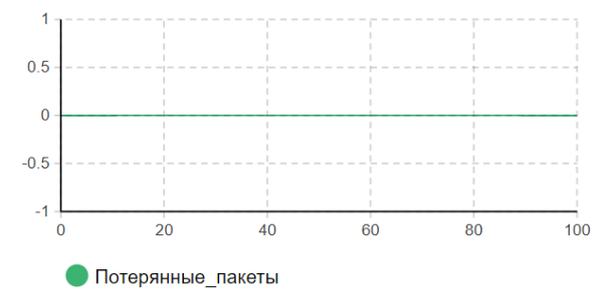
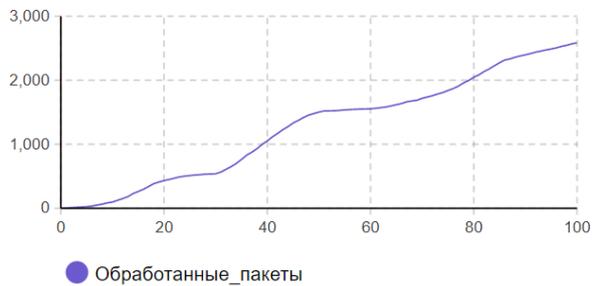
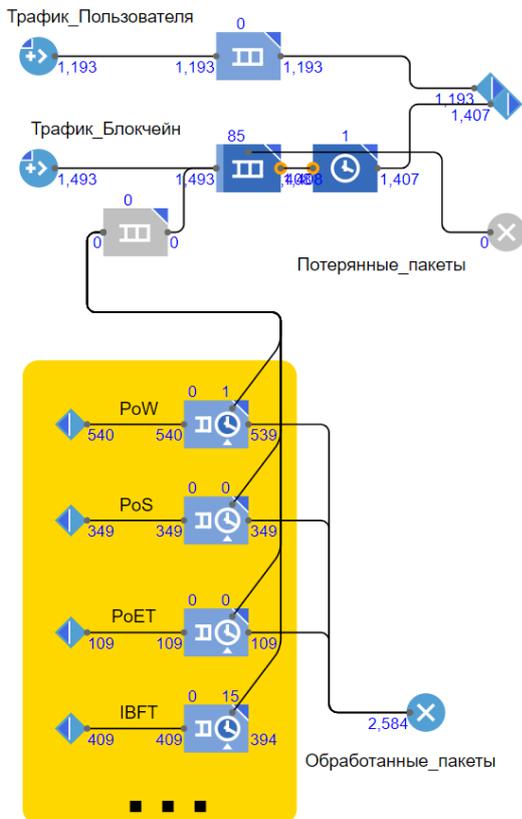


Рисунок 6 – Имитационная модель работы модуля принятия решения адаптивного переключения алгоритмов консенсуса на сети блокчейн

В четвертой главе представлено описание разработки модуля принятия решения для адаптивного выбора алгоритма консенсуса в блокчейн-системах, с акцентом на особенности и ограничения, связанные с функциональностью блокчейна (скорость генерации блоков и количество участников). Представлена модель для оценки эффективности подхода, учитывающая структуру сети и характеристики передачи данных.

В первой части главы на основе интеллектуальных транспортных систем проведена апробация адаптивного подхода, рассмотрено время синхронизации узлов, проанализированы сценарии реагирования на инциденты, которые определяют факторы, влияющие на скорость распространения информации. Предложена архитектура системы, включающая датчики, смарт-контракты и децентрализованное хранилище. Установлено, что скорость распространения информации критически важна для оперативного реагирования на изменения дорожной ситуации.

Далее произведена оценка временных характеристик распространения информации по сети с помощью диаметра графа. Диаметр графа использован как один из ключевых параметров для оценки времени полного распространения информации, что позволило оценить, как быстро узлы могут обмениваться данными.

Представлена модель оценки эффективности разработанного модуля, зависящая от количества созданных блоков и потерь в процессе смены алгоритма консенсуса. Эффективность η (%) определяется как отношение количества «полезных» блоков B_{useful} , созданных после полного переключения на новый алгоритм, к общему количеству созданных блоков B_{total} . Это позволяет оценить, насколько хорошо работает модуль по сравнению с статичными алгоритмами консенсуса (5).

$$\eta = \frac{B_{useful}}{B_{total}} = \frac{N\lambda(T - T_{full})}{N\lambda T} = 1 - \frac{T_{full}}{T} \quad (5)$$

Далее в работе проведено расширение модели, добавлением в нее зависимости от времени генерации блоков T_{block} (секунд) и размера блоков B_{size} (транзакций/блок) с коэффициентом α для корректировки уровня влияния размера блока на сеть. Время генерации блоков и их размер – ключевые параметры, так как при активной генерации транзакций в сети формируется буфер (очередь), который в блокчейне является пулом неподтвержденных транзакций, что влияет на нагрузку сети и эффективность работы консенсуса.

С учетом обозначенных добавляемых параметров результирующий вид модели (6):

$$\eta = 1 - \frac{D(G) \cdot \alpha \cdot B_{size}}{(c_0 - k\lambda_{tx}) \cdot T \cdot T_{block}} \quad (6)$$

Глава также включает апробацию математической модели, включая теоретические расчеты и моделирование для проверки корректности работы модели. Результаты демонстрируют, что эффективность алгоритма зависит от множества факторов, включая диаметр графа, частоту передачи сообщений и время генерации блоков.

Важной частью главы является методика интеграции модуля принятия решения в блокчейн-систему. Описываются шаги, необходимые для анализа сети, разработки аналитической модели, интеграции модулей мониторинга и адаптивного принятия решений.

В завершение, представлена методика оценки эффективности адаптивного выбора блокчейн-систем с учетом характеристик трафика. Описываются этапы от определения исходных параметров, таких как количество узлов и их вычислительные мощности, до анализа влияния различных факторов на производительность системы.

В заключении диссертации изложены основные результаты диссертационной работы, рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе была достигнута цель по снижению коэффициента потери блоков транзакций на сетях связи, благодаря внедрению модуля принятия решения, использующего разработанный алгоритм адаптации консенсуса и частоты генерации блоков к сетевым характеристикам, собираемым с применением разработанного модуля мониторинга. Изложены основные результаты диссертационной работы, а именно:

1) Проведен анализ сетевых характеристик и архитектуры блокчейн-сети. Сформирована теоретическая основа для динамического регулирования параметров работы блокчейн-сети в зависимости от изменений сетевых условий.

2) Разработана аналитическая модель сети связи с блокчейном. В процессе разработки, уточнялись основные параметры, такие как размер блока, частота генерации блоков и типы консенсуса, которые могут быть адаптированы в зависимости от текущего состояния сети. Этап создания аналитической модели позволил точно охарактеризовать поведение сети и выявить возможные слабые места, требующие улучшений.

3) Разработана имитационная модель сети связи с модулем принятия решения по выбору блокчейн-систем для снижения числа потерянных блоков транзакций.

Результаты аналитического расчета и имитационного моделирования демонстрируют уровень расхождения не выше 5%.

4) Интегрирован модуль мониторинга сетевых характеристик. Модуль - ключевое звено системы, которое позволяет в реальном времени отслеживать такие параметры, как пропускная способность сети, задержка, джиттер, а также загрузка процессора и памяти узлов. Эти данные позволяют алгоритму принимать решения о необходимости переключения на более подходящий алгоритм консенсуса в зависимости от текущей нагрузки на сеть.

5) Интегрирован адаптивный модуль принятия решений, который, основываясь на собранных данных, может в режиме реального времени изменять параметры работы сети. Модуль принимает решения о переключении между алгоритмами консенсуса, что позволяет оптимизировать работу блокчейн-сети и снижать время обработки транзакций.

6) Выполнена калибровка параметров модуля принятия решения с уточнением пороговых значений для ключевых сетевых характеристик в количестве десяти единиц.

7) Разработана модель оценки эффективности модуля принятия решения адаптивного выбора консенсуса блокчейн-сети на основе реальных данных. В результате имитационного моделирования было продемонстрировано, что модуль способен значительно улучшить производительность сети, снизив потери данных и улучшив пропускную способность при повышенной нагрузке. Полученные результаты показали, что применение системы с модулем принятия решения и адаптивной сменой консенсуса сети на 10% эффективнее, чем при использовании статичного алгоритма консенсуса. Также проанализированы возможные проблемы, такие как избыточная реакция модуля на малые изменения в сети, что позволило внести корректировки в работу системы.

8) На заключительном этапе описаны методики интеграции модуля принятия решения и оценки его эффективности, которые предполагают его использование в более крупных сетях и с другими алгоритмами консенсуса. Этап также включает рекомендации по интеграции с различными уровнями сетевой инфраструктуры, что обеспечит гибкость и масштабируемость решения в будущем.

Проведенная работа продемонстрировала, что использование адаптивности при выборе и смене консенсуса в блокчейн-сетях позволяет не только повысить эффективность работы системы в условиях изменяющихся сетевых характеристик, но и значительно улучшить устойчивость и производительность сетей.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК

1) Елагин В.С., Спиркина А.В., Владыко А.Г., Иванов Е.И., Помогалова А.В., Аптреева Е.А. Основные сетевые характеристики blockchain трафика и подходы к моделированию // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2020. – Т. 14. № 4. – С. 39–45.

2) Помогалова А.В., Сазонов Д.Д., Бородин А.С., Киричѐк Р.В. Идентификация устройств узкополосных беспроводных сетей связи дальнего действия на основе архитектуры цифровых объектов с применением технологии Blockchain // Электросвязь. – 2021. – № 12. – С. 21–26.

3) Помогалова А.В. Оценка эффективности адаптивного алгоритма блокчейн-сетей, как части мультиконсенсусной системы на сетях связи // Труды учебных заведений связи. – 2024. – № 10(5). – С. 34–42.

4) Помогалова А.В., Донсков Е.А., Елагин В.С. Модель интеграции адаптивного алгоритма выбора и смены консенсуса блокчейна при граничных значениях показателей сети // Электросвязь. – 2024. – №12-2. – С. 16–24.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы цитирования

5) Pomogalova A.V., Donskov E.A., Elagin V.S., Vladyko A.G. Methods for Evaluating Network Characteristics on Blockchain-V2X System Nodes // 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. – 2022. – P. 1–6.

6) Pomogalova A.V., Donskov E.A., Elagin V.S., Vladyko A.G. Blockchain Technologies for Validation of Priority Vehicles in ITS // 2022 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED). – 2022. – P. 1–6.

7) Pomogalova A.V., Donskov E.A., Elagin V.S., Vladyko A.G., Aspects of Data Transfer and Synchronization for Vulnerable Road Users Emergency Scenarios Based on Blockchain Technology in ITS // 2024 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO). – 2024. – P. 1–6.

8) Pomogalova A., Sazonov D., Donskov E., Borodin A., Kirichek R. Identification Method for Endpoint Devices on Low-Power Wide-Area Networks Using Digital Object Architecture with Blockchain Technology Integration // Lecture Notes in Computer Science. – 2021. – V. 13144. – P. 103–114.

Результаты интеллектуальной деятельности

9) **Помогалова А.В.**, Помогалов В.А., Донсков Е.А. Система фиксации, хранения и индексации данных о документах с возможностью генерации цифровой версии документа на базе технологии блокчейн. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2022663086. 11.07.2022.

10) Бакатов В.Н., Мартынюк А.А., **Помогалова А.В.**, Есалов К.Э., Новиков С.С., Мурашкин Н.А., Искра И.И., Сербин А.А. Программный модуль заключения цифровых сделок для применения в мессенджерах мгновенных сообщений. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2022684461. 14.12.2022.

11) Шаляпин С.О., Бакатов В.Н., Ибрагимов Р.Р., Искра И.И., Мурашкин Н.А., Новиков С.С., **Помогалова А.В.**, Фроловнин А.В. Модуль менеджера задач для платформы коммуникаций на базе приватного EVM блокчейна. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2024662552. 29.05.2024.

Отчеты о НИР

12) Шестаков А.В., Громова Н.Н., Кучерявый А.Е., **Помогалова А.В.** и др. Прикладные научные исследования в области создания сетей связи 2030, включая услуги телеприсутствия с сетевой поддержкой, и экспериментальная проверка решений при подготовке отраслевых кадров. Вторая очередь. Шифр «Телепорт-2030». Отчет о НИР. 2022. – 660 с. Номер государственной регистрации: 122020100465-3.

13) Брусиловский С.А., Нестеров А.А., Кучерявый А.Е., **Помогалова А.В.** и др. Прикладные научные исследования в области создания сетей связи 2030, включая услуги телеприсутствия с сетевой поддержкой, и экспериментальная проверка решений при подготовке отраслевых кадров. Шифр «Технология-2030». Отчет о НИР. 2023. – 809 с. Номер государственной регистрации: 123060900012-6.

Публикации в других изданиях

14) **Помогалова А.В.**, Владимиров С.С., Владыко А.Г., Караваев Д.А., Степанов А.Б. Испытательный стенд для исследования сети SD-IOV с технологией LORA // Модернизация информационной инфраструктуры для сетей 5G/IMT 2020 и для других перспективных технологий в интересах трансформации регионов РОСИНФОКОМ-2019. Сб. науч. ст. – СПб., 2019. – С. 21–30.

15) **Помогалова А.В.** Разработка распределенной системы хранения, индексирования и выдачи цифровых документов // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. X Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сб. науч. ст. в 4-х т. – СПб. : СПбГУТ, 2021. – С. 624–628.

16) **Помогалова А.В.**, Донсков Е.А., Котенко И.В. Анализ отказоустойчивости узла блокчейн-сети при моделировании суточной нагрузки на узел транспортной развязки // Региональная информатика (РИ-2022). Юбилейная XVIII Санкт-Петербургская международная конференция. Материалы конференции. – СПб., 2022. – С. 153–155.

17) **Помогалова А.В.**, Дворецков К.А., Мартынюк А.А. Блокчейн как новый уровень развития современных баз данных // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании. XII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция: сб. науч. ст. в 4-х т. – СПб. : СПбГУТ, 2023. – Т. 2. – С. 617–622.

Подписано в печать 22.01.2025. Формат 60×84 1/16.

1,0 а.л. Тираж 100 экз.

Отпечатано в СПбГУТ, 193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22, корп. 1