АННОТАЦИЯ

диссертационной работы на тему:
«Исследование влияния характеристик телетрафика на блокчейн технологий в сетях Smart Grid»,

представленной на соискание степени доктора философии PhD по специальности 8D06201 – «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»

КОНЫРОВА МАДИНА ЖАНАТОВНА

Актуальность работы: Развитие Smart Grid систем сопровождается увеличением числа распределённых объектов генерации и просьюмеров, каждый из которых выступает самостоятельным узлом обмена данными в энергосистеме. Данное обстоятельство изменяет требования к информационно-коммуникационной инфраструктуре. Централизованная и предсказуемая структура информационных потоков, характерная для традиционных электрических сетей, уступает место распределённой архитектуре, в которой обмен данными между приборами учёта, инверторами, контроллерами возобновляемых источников энергии, системами накопления и агентами просьюмеров должен осуществляться непрерывно, с минимальной задержкой и при обеспечении требуемого уровня защищённости.

Smart Grid — это интеллектуальная электроэнергетическая система, которая использует информационный обмен, цифровые средства управления, датчики и исполнительные устройства для координации участников и повышения надёжности электроснабжения.

Увеличение числа распределённых узлов повышает неопределённость режимов функционирования сети и обусловливает необходимость создания механизмов взаимодействия участников энергетического рынка, ориентированных на децентрализованные принципы обмена данными и энергией. Реализация подобных механизмов, включая одноранговую торговлю электроэнергией и платформы на основе технологий распределённых реестров, требует решения задач масштабируемости, интероперабельности протоколов передачи данных, а также синхронизации телеметрической информации в режиме реального времени.

Несмотря на значительный объём исследований, посвящённых архитектуре Smart Grid и вопросам кибербезопасности энергетических систем, остаются недостаточно проработанными вопросы построения комплексных моделей информационного взаимодействия распределённых просьюмеров, учитывающих одновременно требования масштабируемости коммуникационной инфраструктуры и устойчивости к целенаправленным атакам на её отдельные сегменты. В частности, требуют дальнейшего развития методы оценки защищённости распределённых коммуникационных архитектур с учётом специфики протоколов обмена данными между разнородными устройствами Smart Grid, а также подходы к проектированию

отказоустойчивых информационных платформ для децентрализованной торговли энергией.

Цель исследования: Исследование эффективности применения методов теории телетрафика и блокчейн технологий в Smart Grid.

Объект исследования: Коммуникационная инфраструктура Smart Grid.

Предмет исследования: Влияние характеристик телетрафика на эффективность функционирования блокчейн технологий в коммуникационной инфраструктуре.

Методы исследования: В работе использованы методы теории массового обслуживания, теории телетрафика и теории графов. Для компьютерного моделирования применялись программные средства: MatPower (MatLab), Visual Studio Code, Ganache.

Задачи исследования:

1. Исследовать влияние интенсивности входящего трафика на показатели работы Smart Grid системы.
2. Разработать и реализовать алгоритм маршрутизации энергетических запросов на основе графовой модели сети с исполнением и верификацией транзакций посредством смарт-контрактов блокчейн инфраструктуры.
3. Провести экспериментальную оценку эффективности разработанной модели по показателям качества обслуживания коммуникационной системы, включая время обработки запросов, задержку передачи данных и пропускную способность сети.

Научная новизна исследования:

1. Предложен алгоритм смены режимов работы коммуникационной системы Smart Grid с учётом дефицита мощности и интенсивности телетрафика.
2. Предложен алгоритм смарт контрактов на блокчейн платформе в сети Smart Grid на основе графовой минимизации потерь.
3. Разработана модель, объединяющая алгоритм управления телетрафиком с алгоритмом маршрутизацией и блокчейн верификацией, так же оценена её эффективность для сетей Smart Grid.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Переход коммуникационной системы обработки заявок Smart Grid из аварийного режима, активируемого при дефиците мощности, в режим перегрузки определяется порогом интенсивности нагрузки $A \geq 7$ Эрл, что положено в основу разработанного алгоритма смены режимов.
2. Блокчейн алгоритм смарт-контрактов на основе графовой минимизации потерь обеспечивает задержку выполнения смарт-контрактов менее 0,5 с.
3. Модель управления информационными потоками Smart Grid, объединяющая алгоритм смены режимов и блокчейн алгоритм маршрутизации, по сравнению с базовой моделью снижает время выполнения на 20,9 % и задержку транзакций на 21 %, а пропускную способность (TPS) увеличивает на 48,9 %.

Личный вклад автора: все результаты исследования, представленные в диссертации, получены путем непосредственного участия автора в экспериментальных исследованиях и обработки результатов экспериментов.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты диссертационного исследования: международная конференция ACM (Алматы 2021), международная конференция по коммуникациям ,информации, электронным и энергетическим системам, CIEES 2022 (Варна 2022), ежегодный международный конгресс по возобновляемым источникам энергии (Оксфорд 2024), международная конференция по технологиям и приложениям для интеграции возобновляемых источников энергии ICREITA-24 (Рим 2024) докладывали и обсуждали.

Практическая значимость исследования: Научные результаты диссертационной работы внедрены в корпоративную среду компании «Internet Training Center». Так же, внедрено программное решение, основанное на инструментах MatLab и Matpower, позволяющее моделировать и оптимизировать потоки энергии. Разработанное программное обеспечение используется для создания научной основы, способствующей дальнейшему развитию методов оптимизации и расширению использования возобновляемых источников энергии. Это закреплено актом внедрения.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 9 научных публикациях. Из них 2 статьи опубликована в научных изданиях, рекомендованных комитетом по обеспечению качества в сфере образования и науки Министерства науки и высшего образования РК, 3 статьи опубликованы в зарубежных научных журналах, включенных в базу Scopus. Кроме того, на международных научно-практических конференциях были представлены 3 доклада и опубликованы материалы. 4 октября 2024 года получено авторское свидетельство РК №50222 для исследования на тему «Интеграция технологий блокчейн в интеллектуальные энергосистемы».

Объем и структура диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, определений, сокращений, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Библиографический список включает 109 наименований. Общий объем работы составляет 118 страниц, содержит 34 рисунков и 9 таблиц.

Диссертация посвящена разработке модели управления энергетическими потоками в интеллектуальных сетях на основе комплексного применения методов теории телетрафика, графовой оптимизации и блокчейн технологий. На их основе разработана модель управления, которую затем сравнили с существующими подходами по критериям: насколько она эффективна, устойчива и масштабируема.

Первая глава посвящена анализу энергетического сектора Казахстана. Определены основные тенденции развития возобновляемых источников энергии и технологий Smart Grid в стране. Отдельно разбираются стратегии низкоуглеродного развития и то, какое место в них занимает солнечная и ветровая генерация.

Вместе с тем возобновляемой энергетике присущ ряд ограничений. Основным из них является нестабильность генерации, обусловленная зависимостью от погодных условий и времени суток, что требует применения систем накопления энергии для поддержания устойчивости режима работы сети в периоды пиковых нагрузок. Отдельное внимание уделено вопросам государственного регулирования, инвестиционной поддержки и внедрения энергоэффективных технологий. Выполнен анализ современных технологических подходов к построению интеллектуальных энергетических систем, включая методы теории массового обслуживания, теории графов, технологии Интернета вещей и блокчейн. Выявлены преимущества и ограничения существующих подходов, определены их научно-технические проблемы и обоснована необходимость разработки комплексного подхода к управлению интеллектуальными сетями.

Во **второй главе** рассмотрены теоретические и технологические основы моделирования интеллектуальных систем, основанные на интеграции методов теории телетрафика, теории графов и распределенных цифровых технологий. Проанализированы возможности применения моделей массового обслуживания для описания процессов приоритетного управления в аварийных ситуациях, а также оценки характеристик функционирования сетей, включая загрузку и вероятность перегрузок. Рассмотрено применение теории графов для структурного представления систем в виде взвешенных ориентированных графов. Показано, что данный подход позволяет формализовать процессы построения оптимизированных маршрутов по критерию минимальных потерь для повышения эффективности при выборе генератора. Исследованы возможности использования блокчейн технологий для организации децентрализованного взаимодействия участников энергетического рынка. Отмечено, что применение смарт контрактов и распределённых реестров обеспечивает прозрачность, автоматизацию расчётов и повышение надежности обмена энергетическими ресурсами. В целом во второй главе обоснована целесообразность комплексного применения указанных методов для построения интеллектуальных систем нового поколения, ориентированных на повышение эффективности, устойчивости и надежности функционирования.

В **третьей главе** исследованы математические модели теории телетрафика с двухуровневой системой приоритетов заявок, обеспечивающей дифференциацию обработки различных типов трафика и повышение качества обслуживания критически важных запросов. Так же, были изучены модели установившегося режима электроэнергетической системы с использованием среды MatLab и пакета MatPower, обеспечивающего расчёт потоков мощности, уровней напряжения и потерь в сети. На основе результатов моделирования предложено графовое представление энергосистемы, в котором узлы соответствуют шинам, а ребра – линиям электропередачи с весами, определяемыми потерями активной мощности. Для оптимизации маршрутов передачи энергии применён алгоритм Дейкстры, позволяющий определять пути с минимальными суммарными потерями мощности между

генераторами и потребителями. Отдельно рассмотрен механизм блокчейн верификации. Он фиксирует выбранные маршруты и проверяет их с помощью криптографических хеш-функций и смарт контрактов. Это исключает возможность подмены данных о маршруте после его выбора.

В итоге глава сводит воедино четыре разных подхода — расчет установившихся режимов, теорию телетрафика, теорию графов и блокчейн — в одну модель оптимизации потокораспределения интеллектуальной системы.

Четвертая глава проверяет предложенную модель на практике. Эксперименты проводились в тестовой среде Ethereum на базе PoA (Ganache/Truffle). Оценивались четыре показателя: время выполнения операций, задержка обработки транзакций, пропускная способность и расход вычислительных ресурсов. Результаты дополнительно прошли статистическую валидацию, а отдельно был проверен вопрос масштабируемости, как система ведет себя при росте нагрузки.

В **заключении** обобщены основные результаты диссертационного исследования. Показано, что интеграция методов теории графов, телетрафика и блокчейн технологий позволяет создать эффективную модель управления энергетическими потоками в интеллектуальных сетях. Разработанная система обеспечивает оптимизацию управления в интеллектуальной сети, повышение прозрачности энергетических транзакций и автоматизацию процессов обмена энергией. Использование смарт контрактов в разрешенной блокчейн сети обеспечивает надёжность, неизменяемость и аудитируемость операций. Полученные результаты подтверждают перспективность применения предложенного подхода для развития децентрализованных систем и повышения эффективности управления интеллектуальной инфраструктурой.

Из данной диссертационной работы были сделаны следующие выводы:

1. Исследовано влияние интенсивности входящего трафика на работу коммуникационной системы Smart Grid. Установлено, что при дефиците мощности система переходит в аварийный режим. При интенсивности нагрузки $A \geq 7$ Эрл она переходит в режим перегрузки, в котором резко растёт время ожидания обслуживания заявок. На основе этой закономерности разработан алгоритм смены режимов работы.

2. Разработан и реализован блокчейн алгоритм смарт-контрактов для маршрутизации энергетических запросов. Маршрут с минимальными потерями определяется на графовой модели сети, а транзакции исполняются и верифицируются смарт-контрактами. Задержка выполнения смарт-контрактов не превышает 0,5 с.

3. Проведена экспериментальная оценка эффективности модели управления информационными потоками Smart Grid. По сравнению с базовой моделью время обработки запросов снижено на 20,9 %, задержка транзакций — на 21 %, пропускная способность (TPS) увеличена на 48,9 %. Это подтверждает повышение масштабируемости и производительности системы.

В **приложениях** собраны ключевые данные по результатам исследовании:

1. Код смарт контракта

2. Авторское право