НЕКОММЕРЧЕСКОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева»

На правах рукописи

КОНЫРОВА МАДИНА ЖАНАТОВНА

Исследование влияния характеристик телетрафика на блокчейн технологий в сетях Smart Grid

8D071900 – «Радиотехника, электроника и телекоммуникации»

Диссертация на соискание степени
доктора философии (PhD)

Научные консультанты:
кандидат технических наук
К. С. Чежимбаева

Зарубежный научный консультант:
кандидат технических наук,
доцент Русенского университета имени Ангела Кынчева
Т. Илиев

Республика Казахстан
Алматы, 2026 год

	ОПРЕДЕЛЕНИЯ	4
	ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	6
	ВВЕДЕНИЕ	8
1	**ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР**	13
1.1	Концепция Smart Grid и интеграция возобновляемых источников энергии	14
1.2	Современное состояние энергетического сектора	16
1.2.1	Мировые тенденции развития энергетики	17
1.2.2	Энергетический сектор Республики Казахстан	19
1.3	Исследование текущих проблем Smart Grid и существующие технологические решения	23
1.3.1	Проблемы внедрения интеллектуальных систем (Smart Grid)	23
1.3.2	Обзор технологических решений в интеллектуальных системах	24
	Выводы по главе 1	29
2	**МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ**	30
2.1	Теория телетрафика	30
2.2	Теория графов в Smart Grid	38
2.3	Блокчейн технологии в интеллектуальных системах	41
	Выводы по главе 2	48
3	**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ВХОДЯЩЕГО ПОТОКА И МАРШРУТИЗАЦИИ С БЛОКЧЕЙН ВЕРИФИКАЦИЕЙ**	49
3.1.1	Основы теории телетрафика для моделирования входящего потока	51
3.1.2	Расширенная модель M/M/V с двухуровневой системой приоритетов	57
3.2.1	Моделирование установившегося режима в MatLab/MatPower	63
3.2.2	Графовая модель Smart Grid системы и алгоритм Дейкстры	73
3.3	Математическая модель блокчейн верификации маршрутов в задаче потокораспределения энергии	76
	Выводы по главе 3	78
4	**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ОЦЕНКА И ОБСУЖДЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДЛОЖЕННОЙ МОДЕЛИ**	79
4.1	Экспериментальная среда и методика оценки	79
4.2	Результаты экспериментальной оценки	81
4.2.1	Энергетическая эффективность маршрутизации	81
4.2.2	Производительность блокчейн инфраструктуры	81
4.2.3	Экологическая эффективность и статистическая валидация	87

4.3 Архитектурная реализация и программная модель предложенной системы 90
Выводы по главе 4 100
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 102
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 106
ПРИЛОЖЕНИЕ А 115
ПРИЛОЖЕНИЕ В 118

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

- **Smart Grid** – модернизированные электрические сети, использующие информационные и коммуникационные сети и технологии для сбора информации о производстве и потреблении электроэнергии, что позволяет автоматически повышать эффективность, надежность, экономическую выгоду, а также устойчивость производства и распределения электроэнергии.
- **Возобновляемые источники энергии** – энергетические ресурсы, возобновляемые в человеческом масштабе или неисчерпаемые. Основной принцип использования возобновляемой энергии заключается в её получении из постоянно происходящих в окружающей среде процессов или возобновляемых органических ресурсов и обеспечении её технического применения.
- **Виртуальная электростанция** – система, объединяющая различные источники энергии, такие как ветровые, солнечные, гидроэлектростанции, а также системы хранения энергии и потребителей энергии.
- **Интернет вещей** – концепция сети передачи данных между физическими объектами, оснащёнными встроенными средствами и технологиями для взаимодействия друг с другом или с внешней средой.
- **Информационно-коммуникационные технологии** – процессы, использующие средства и методы сбора, обработки, накопления и передачи данных для получения информации нового качества о состоянии объекта, процесса или явления, а также способы распространения информации и реализации таких процессов и методов.
- **Теория телетрафика** – раздел теории массового обслуживания, являющийся математической теорией. В основном применяется для исследования и проектирования телекоммуникационных систем.
- **Блокчейн** – непрерывная последовательная цепочка блоков, содержащих любую информацию, сформированную по определённым правилам.
- **Интернет энергии** – система, в которой учреждения и дома, производящие электроэнергию, взаимодействуют друг с другом и могут осуществлять взаимную торговлю энергией по специальному сетевому тарифу.
- **Просьюмер или потребитель** – лицо, активно участвующее в процессе производства потребляемых им товаров и услуг.
- **Одноранговая сеть** – распределённая сеть, основанная на равноправии участников.
- **Ganache** – программное обеспечение, широко используемое разработчиками для создания локальной блокчейн сети в целях тестирования и разработки.
- **Эфир (ETH)** – нативная криптовалюта платформы Ethereum, выступающая основным средством обмена в её экосистеме.
- **Ethereum** – платформа для создания децентрализованных онлайн-сервисов на основе блокчейна, работающая на базе криптовалюты и смарт-контрактов.

- **Solidity** – язык программирования, специально разработанный для написания смарт-контрактов в Ethereum.
- **Посредники** – организации, обеспечивающие обмен энергией между производителями и потребителями.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

Общие сокращения и предметная область

- **SG** – Smart Grid – интеллектуальная энергетическая сеть
- **ЭЭС** – электроэнергетическая система
- **ВИЭ** – возобновляемые источники энергии
- **IoT** – Internet of Things – Интернет вещей
- **ICT (ИКТ)** – информационно-коммуникационные технологии
- **QoS** – Quality of Service – качество обслуживания
- **5G** – мобильная сеть пятого поколения
- **CO_2** – диоксид углерода
- **МЭА** – Международное энергетическое агентство

Архитектуры и энергетические концепции

- **VPP** – Virtual Power Plant – виртуальная электростанция
- **VHPP** – Virtual Heat and Power Plant – виртуальная теплоэлектроцентраль
- **DER** – Distributed Energy Resources – распределенные энергетические ресурсы
- **RES** – Renewable Energy Sources – возобновляемые источники энергии
- **TCLS** – Thermostatically Controlled Loads – термостатически управляемые нагрузки
- **Prosumer** – участник энергосистемы, совмещающий функции производителя и потребителя

Алгоритмы, модели и вычислительные методы

- **OPF** – Optimal Power Flow – оптимальный поток мощности
- **AC Load Flow** – расчет установившегося потокораспределения
- **Dijkstra** – алгоритм поиска кратчайшего пути
- **M/M/1, M/M/V, M/M/8** – модели массового обслуживания
- **Poisson process** – пуассоновский поток заявок (входная модель)
- **Erlang B / Erlang C** – модели вероятности блокировки и ожидания
- **PoA** – Proof-of-Authority – механизм консенсуса блокчейна

Теория графов и энергосети

- **G = (V, E)** – граф электрической сети
- **V** – множество узлов сети
- **E** – множество линий (ребер)
- **w(e)** – вес ребра (потери мощности)
- **P** – маршрут (путь в графе)
- **L(P)** – суммарные потери на маршруте
- **ng, nc** – генератор и потребитель
- **ng*** – оптимально выбранный генератор
- **Popt** – оптимальный маршрут
- **Lmin** – минимальные потери

Телетрафиковая модель

- **λ** – интенсивность поступления заявок

- **λ_1** – поток заявок высокого приоритета
- **λ_2** – поток заявок низкого приоритета
- **μ** – интенсивность обслуживания
- **K** – число каналов обслуживания
- **ρ** – коэффициент загрузки системы
- **ω** – доля заявок высокого приоритета
- **ri** – заявка
- **C1** – класс заявок высокого приоритета
- **C2** – класс заявок низкого приоритета
- **N(t)** – число занятых каналов обслуживания

Блокчейн и смарт-контракты

- **Ethereum** – платформа смарт-контрактов
- **Smart Contract** – программное соглашение, исполняемое в блокчейне
- **Transaction** — транзакция в блокчейне
- **Block** – блок данных в распределенном реестре
- **Validator** – узел-валидатор сети
- **On-chain** – операции внутри блокчейна
- **Off-chain** – вычисления вне блокчейна
- **Ganache** – локальная Ethereum-тестовая сеть
- **Geth** – клиент Ethereum
- **Truffle** – фреймворк разработки смарт-контрактов
- **Web3.js** — библиотека взаимодействия с Ethereum
- **MetaMask** – криптокошелек и интерфейс доступа к блокчейну
- **Remix IDE** – среда разработки смарт-контрактов

Метрики производительности системы

- **TPS** – пропускная способность (транзакций в секунду)
- **Latency** – задержка транзакции
- **Execution Time** – время выполнения транзакции
- **Gas / kGas** – вычислительные затраты в Ethereum
- **Carbon emissions (CO_2 footprint)** – углеродные выбросы системы

Сетевые и инфраструктурные понятия

- **PoW** – Proof of Work (доказательство работы)
- **PoS** – Proof of Stake (доказательство доли / доли владения)
- **P2P** – одноранговая сеть
- **IPFS** – распределенная файловая система
- **SCADA** – система диспетчерского управления
- **PMU** – измерительный блок энергосистемы
- **DSO / TSO** – распределительный / системный оператор сети

ВВЕДЕНИЕ

Глобальные изменения в современной энергетической отрасли направлены на формирование устойчивых и эффективных энергетических систем. Развитие возобновляемых источников энергии и концепции Smart Grid перестало носить узкоспециализированный характер и приобрело статус приоритетного направления модернизации энергетической отрасли.

Smart Grid — это электросети, где решения принимаются на основе данных, а не только фиксированных настроек. Датчики и коммуникационные технологии обеспечивают информационный обмен между элементами сети: данные о нагрузке генератора и о спросе потребителя используются системой для оперативной корректировки режимов работы. Именно этот двусторонний обмен данными и дает основные преимущества, такие как гибкое управление нагрузкой, более надежное электроснабжение, возможность подключать распределенные источники генерации.

Особенно это заметно на возобновляемых источниках. Солнечная и ветровая генерация нестабильна по своей природе и зависит от погодных условии. В такой момент Smart Grid начинает регулировать в реальном времени перераспределяя нагрузку между источниками, компенсируя эти провалы. В условиях роста энергопотребления и усиления требований к энергетической безопасности возрастает необходимость внедрения современных цифровых технологий в энергетический сектор. В Республике Казахстан приоритетными направлениями развития являются модернизация энергетической инфраструктуры, расширение использования возобновляемых источников энергии, а также внедрение технологий Smart Grid, направленных на повышение энергетической независимости и экологической устойчивости.

Актуальность работы: Стремительный рост доли возобновляемых источников энергии в энергосистемах и развитие телекоммуникационных технологий обусловили необходимость разработки новых рыночных механизмов для взаимодействия просьюмеров в условиях высокой неопределенности режимов работы распределенных Smart Grid систем. С другой стороны, рост популярности и увеличение количества Smart Grid систем повышает вероятность нарушений информационной безопасности. Потенциальные угрозы варьируются от манипуляций с приборами учета до целевых атак на критическую инфраструктуру, что, в свою очередь, может привести к нарушению функционирования региональных или национальных тепловых и электрических сетей.

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 117 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.

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

1. Код смарт контракта
2. Авторское право

1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

1.1 Концепция Smart Grid и интеграция возобновляемых источников энергии

Согласно Парижскому соглашению 2015 года [1], Посланию Президента РК «Казахстан-2050» [2], а также разрабатываемой Концепции низкоуглеродного развития Казахстана до 2050 года, остро стоит задача глубокой декарбонизации энергетики Казахстана. Одним из ключевых инструментов реализации данной цели является переход к использованию экологически чистых возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

ВИЭ (возобновляемая энергетика) – это совокупность источников энергии, которые восполняются естественным образом и являются практически неисчерпаемыми в масштабах человеческой цивилизации. К ней относится не только солнце и ветер, так же относятся гидроэнергетика, биомасса, геотермальная энергия и энергия океана.

Главное их преимущество — экологичность. Поскольку нет парниковых газов и загрязнения. При этом солнце и ветер практически неисчерпаемы, а КПД их преобразования в электричество достаточно высок, чтобы заметно снижать потребление ископаемого топлива. За счет этого страна меньше зависит от импорта энергоресурсов и становится энергетически независимее.

Есть и системный эффект: солнечные батареи и ветряные турбины можно ставить локально, снимая часть нагрузки с централизованной сети и повышая ее устойчивость в целом.

За последнее десятилетие оборудование ВИЭ заметно подешевело. Эффективнее стало и само оборудование, и масштабы его производства выросли, что и сделало возобновляемую энергетику конкурентоспособной. Это, в свою очередь, подтолкнуло развитие смежных технологий: накопителей энергии, интеллектуального управления нагрузкой, умных сетей. Неудивительно, что и государства, и международные организации сегодня поддерживают такие проекты как политически, так и финансово ради климатических целей.

При всех перспективах у ВИЭ есть и обратная сторона. Главная проблема — нестабильность. Солнце светит не всегда, ветер меняет силу непредсказуемо, а значит, генерация напрямую зависит от погоды и времени суток. Компенсировать эти провалы можно только за счет накопителей энергии и резервных источников.

Существенным ограничением также является высокая капиталоемкость проектов: строительство солнечных станций, ветропарков и гидросооружений требует значительных первоначальных инвестиций и именно высокий порог входа чаще всего тормозит масштабирование отрасли. Так же имеются и географические особенности. Не везде подходят условия для гидро- или

морской энергетики, что автоматически исключает эти технологии для многих регионов.

Экологичность ВИЭ тоже не абсолютна. Гидроэнергетика меняет водные экосистемы, а производство панелей и турбин требует немало сырья и материалов, само по себе не бесследно для природы. И наконец, техническая сторона тоже присутствует, увеличение доли ВИЭ в сети сопровождается повышением риска перегрузки линий электропередачи и колебаний частоты и напряжения, что снижает общую надежность энергосистемы.

В этой связи развитие возобновляемой энергетики требует комплексного решения технических, экономических, социальных и политических задач для обеспечения ее эффективного и устойчивого функционирования в долгосрочной перспективе.

В целом ВИЭ представляют собой перспективную альтернативу традиционным источникам энергии, и их использование продолжает расширяться. Вместе с тем для эффективной интеграции ВИЭ в энергосистему необходимо решить ряд технических, экономических и социальных проблем, связанных с их внедрением и эксплуатацией.

Ключевым элементом, способствующим эффективной интеграции возобновляемых источников энергии в энергетическую систему, является концепция Smart Grid (интеллектуальная сеть). Smart Grid представляет собой современную электроэнергетическую систему, использующую информационно-коммуникационные технологии для повышения эффективности, надежности, экономичности и устойчивости процессов производства, передачи и распределения электроэнергии [3].

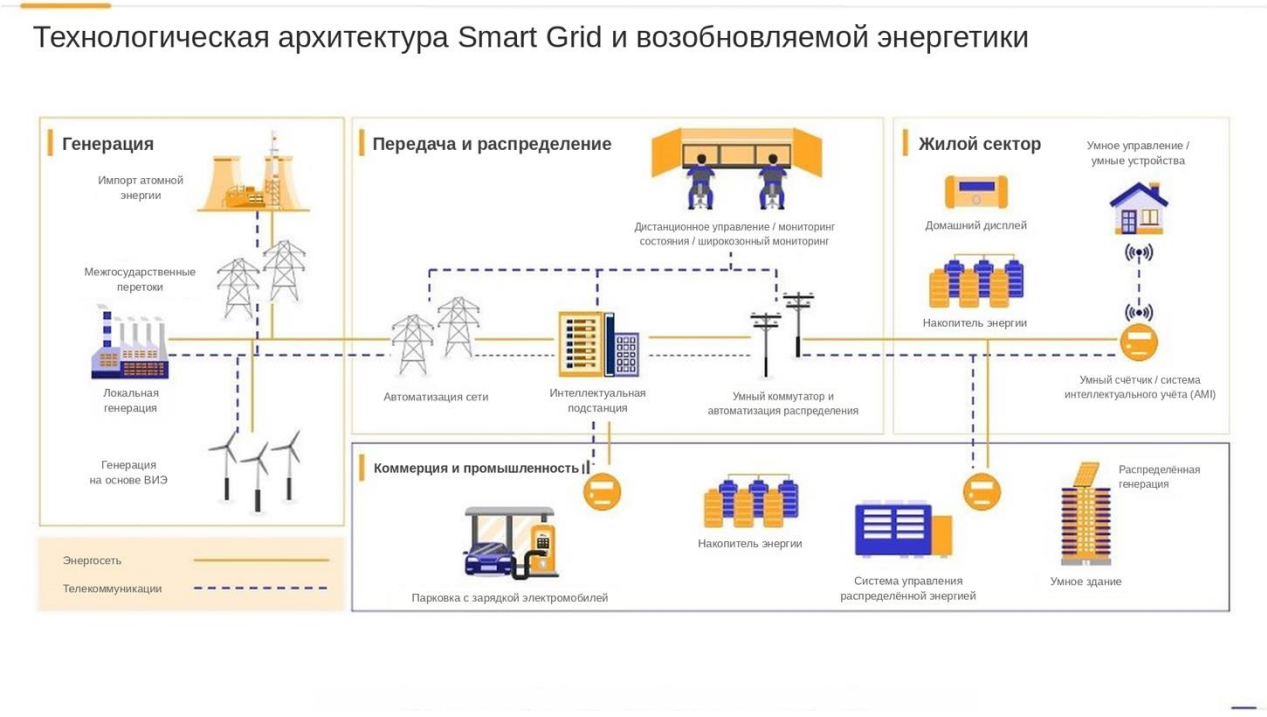

Рисунок 1.1 – Smart Grid системы [4]

В отличие от традиционных электрических сетей, система Smart Grid обеспечивает двусторонний обмен информацией между поставщиками электроэнергии и потребителями. Это дает более гибкое управление всей цепочкой, от производства до распределения энергии, кроме того, упрощает подключение возобновляемых источников. Есть и другой эффект: сеть сама замечает сбои и реагирует на них, а значит, обслуживание требует меньше времени и денег. Особенно это выручает с солнечными панелями и ветровыми установками. Их выработка скачет непредсказуемо, и без такой автоматики справляться с ними было бы сложнее [5].

Smart Grid дает операторам сети возможность следить за распределением энергии и быстро реагировать на изменения спроса или выработки. Датчики и аналитика показывают полную картину происходящего в сети в реальном времени, и именно на этих данных операторы принимают решения, а не действуют вслепую [6].

В основе управления спросом лежит прогнозирование в реальном времени. Система заранее видит, где намечается пик, и перераспределяет нагрузку так, чтобы его сгладить. На практике это может выглядеть просто. В часы затишья водонагреватель включается сам, а в пиковые часы снижает потребление. Потребителей при этом стимулируют переносить активность на непиковые часы, например через тарифы. В сумме это снижает нагрузку на систему настолько, что порой отпадает нужда строить дополнительные генерирующие мощности только ради покрытия пиков [7].

Умные счетчики показывают потребителю, сколько энергии он тратит и когда. И это само по себе меняет поведение в сторону экономии. Если сложить сюда оптимизацию потребления и снижение пиков, то экономия получается ощутимой. Причем не только в энергии, но и в деньгах [8]. Излишки энергии от ВИЭ не пропадают зря. Smart Grid направляет их в системы накопления, откуда энергия возвращается в сеть при пиковом спросе или падении генерации. В итоге мы имеем более стабильную сеть, выше качество электроэнергии и меньше потерь при передаче [9]. По сути, Smart Grid не просто улучшение, а необходимое условие для того, чтобы возобновляемая энергетика вообще работала эффективно. Без нее сложно рассчитывать на надежное и экономичное электроснабжение в тех масштабах, которые нужны уже сейчас.

Указанные изменения формируют новую архитектуру мировой энергетики, что обусловливает необходимость анализа современных тенденций ее развития.

1.2 Современное состояние энергетического сектора

За последнее десятилетие в мировой энергетике произошли существенные изменения, связанные с переходом к принципам устойчивого развития. Меньше выбросов, больше разнообразия в источниках энергии. Дальше в этой работе рассмотрено, как выглядит энергетический сектор сегодня, как в мире в целом, так и отдельно в Казахстане.

1.2.1 Мировые тенденции развития энергетики

Возобновляемая энергетика сейчас растет заметнее, чем когда-либо. Доля солнечной и ветровой генерации в мировом энергобалансе увеличивается год от года, а инвестиции в эти технологии выросли в разы.

Параллельно начинает волновать не менее актуальная тема о энергоэффективности. Все больше стран задумываются не только о том, откуда брать энергию, но и о том, как тратить меньше уже имеющейся. На уровне компаний и государств активно разрабатываются и внедряются технологические решения, направленные на сокращение энергопотребления и повышение эффективности энергетических процессов в различных отраслях.

Наблюдается активная электрификация транспортного сектора. Электромобили и другие виды электрического транспорта получают широкое распространение в мировом масштабе, что сопровождается изменениями в структуре энергопотребления и развитием зарядной инфраструктуры.

Наблюдается усиление роли цифровизации в энергетическом секторе. Интеллектуальные сети и информационно-коммуникационные технологии способствуют совершенствованию управления энергосистемами, оптимизации использования ресурсов и обеспечению надежного и эффективного энергоснабжения.

Международным энергетическим агентством (МЭА) опубликован аналитический отчет «Мониторинг рынка чистой энергии – март 2024», в котором представлен анализ прогресса в разработке и внедрении технологий экологически чистой энергетики. Данный отчёт является первым в серии публикаций, обобщающих современные тенденции в ключевых сегментах чистой энергетики и оценивающих их влияние на мировые энергетические рынки. С учетом ускорения внедрения чистых энергетических технологий с 2019 года исследование охватывает период 2019–2023 годов.

За рассматриваемый период инвестиции в чистую энергетику увеличились почти на 50%, достигнув 1,8 трлн долларов США в 2023 году. Отмечается, что ежегодный прирост составил примерно 10%. Возобновляемая энергетика давно перестала быть нишевым сегментом. Сейчас это отрасль, заметно влияющая на мировую экономику в целом.

2023 год стал рекордным для чистой энергетики: мощности солнечной генерации выросли на 85%, ветровой на 60%, а суммарный прирост по обоим направлениям составил почти 540 ГВт. Большая часть этих новых мощностей пришлась на Китай.

Но рост оказался крайне неравномерным. Китай и развитые страны обеспечили около 90% всего прироста солнечных и ветровых мощностей, и более 95% мировых продаж электромобилей.

Продажи электромобилей выросли на 35%, до 14 млн штук, то есть почти каждый пятый проданный в мире автомобиль был электрическим. Китай

снова впереди, электромобили достигли треть всех продаж, в Евросоюзе — около четверти.

С 2019 по 2023 год генерация на ВИЭ росла примерно вдвое быстрее, чем на ископаемом топливе. Та же пропорция сохранилась и в конечном энергопотреблении. В абсолютных цифрах выработка электроэнергии с низкими выбросами выросла почти на 1800 ТВт·ч. И это несмотря на то, что гидроэнергетика стагнировала, а атомная генерация просела из-за засухи и вынужденных остановок реакторов в ЕС. Для сравнения: производство энергии на ископаемом топливе выросло менее чем на 850 ТВт·ч, это почти вдвое меньше.

Спрос на уголь при этом снижался. И главную роль здесь сыграли именно солнечная и ветровая энергетика. Они «вытеснили» примерно 320 и 235 млн тонн условного топлива в год соответственно. Это эквивалентно годовому объему потребления угля для производства электроэнергии в Индии и Индонезии в совокупности.

Сокращение спроса на природный газ составляет около 180 млрд м³ в год. Отмечается, что данный объем превышает трубопроводный экспорт природного газа из России в Европейский союз до начала специальной военной операции, который в 2021 году составлял около 150 млрд м³.

Сокращение спроса на нефть оценивается почти в 1 млн баррелей в сутки. В отсутствие данного снижения мировой спрос на нефть превысил бы уровень, зафиксированный до пандемии COVID-19. Основная часть сокращения спроса на нефть обусловлена ростом использования электромобилей.

Внедрение солнечной и ветровой энергетики, атомной энергетики, электромобилей и тепловых насосов в период с 2019 по 2023 год обеспечивает ежегодное сокращение выбросов примерно на 2,2 млрд тонн. В отсутствие данных технологий рост глобальных выбросов CO_2 за тот же период оказался бы втрое выше фактического уровня**.**

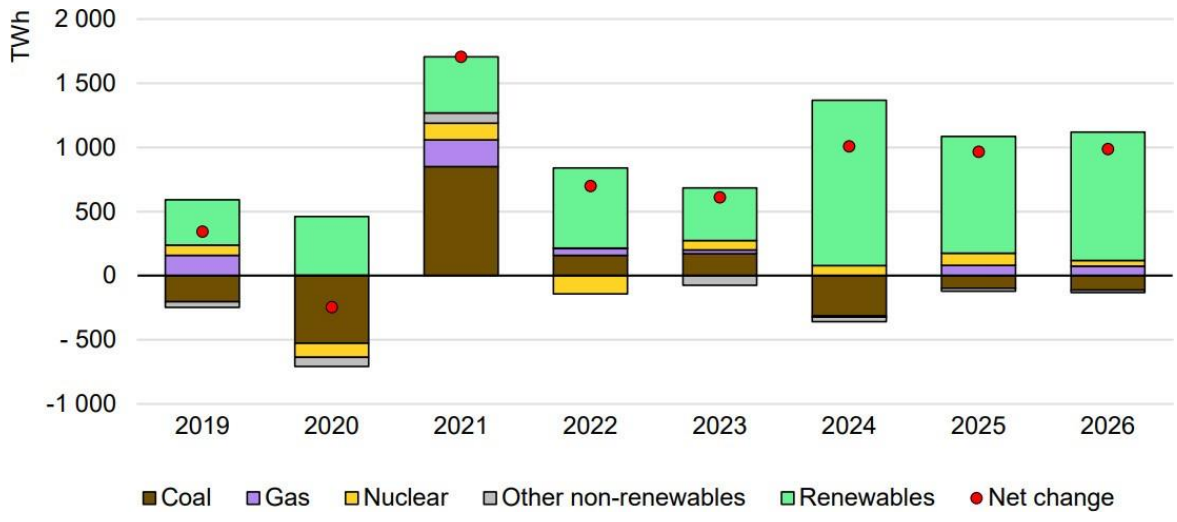

Рисунок 1.2 – Динамика производства электроэнергии в мире по источникам в годовом исчислении, 2019–2026 гг. [10]

По мнению МЭА [11], рост производства электроэнергии за счет возобновляемых источников и атомной энергетики способствует структурному снижению выбросов в энергетическом секторе. Предполагалось, что в последующие три года производство электроэнергии с низким уровнем выбросов будет расти примерно в два раза быстрее, чем среднегодовые темпы роста в период 2018–2023 годов. Прогнозы подтвердились: в 2024 году выбросы от производства электроэнергии сократились на 2,6%, а в 2025-м темпы снижения выросли до 3%. Если тенденция сохранится, к 2030 году доля ВИЭ в мировой генерации может достичь около 50%.

Эти глобальные сдвиги напрямую затрагивают и национальные энергосистемы, в том числе казахстанскую, к которой стоит присмотреться отдельно.

1.2.2 Энергетический сектор Республики Казахстан

Энергетический сектор Республики Казахстан находится на этапе модернизации, охватывающей несколько взаимосвязанных направлений.

Энергобаланс страны разнообразен: уголь, нефть, газ, атомная энергетика и ВИЭ. При этом роли у них разные, в перспективе нефть и газ идут в основном на экспорт, а солнце и ветер развивают прежде всего для покрытия спроса внутри страны.

У Казахстана здесь есть явное преимущество, такое как большой потенциал по солнцу и ветру, и государство этим пользуется. Проекты электростанций уже на разных стадиях реализации, а инвесторам создают условия для входа в отрасль.

Отдельным направлением развития является повышение энергоэффективности. Соответствующие программы и стимулы внедряют сразу в нескольких секторах экономики, чтобы снизить энергопотребление и упорядочить сами энергетические процессы.

Модернизация инфраструктуры идет по трем фронтам. Старые электростанции реконструируют, строят новые генерирующие мощности, а заодно повышают эффективность самих сетей передачи и распределения энергии.

Отрасль активно открыта и вовне. Совместные проекты с международными партнерами, обмен опытом, приток иностранных инвестиций.

Казахстан придает большое значение вопросам энергетической безопасности и диверсификации источников энергии. В стране разработана стратегия диверсификации энергетического баланса и снижения зависимости от импорта энергоресурсов.

В целом энергетический сектор Казахстана находится в стадии устойчивого развития, включая расширение использования ВИЭ, модернизацию инфраструктуры и укрепление международного сотрудничества. Казахстан стремится к устойчивому и эффективному развитию

энергетики с учетом глобальных энергетических тенденций и современных вызовов.

В Казахстане реализуется ряд проектов в области солнечной и ветровой энергетики. Ниже представлены примеры таких проектов, а также основные меры государственной поддержки их развития:

- Байнаурский проект – строительство солнечной электростанции мощностью 50 МВт в Южно-Казахстанской области. В рамках этого проекта государство предоставляет разработчику проекта такие инвестиционные стимулы, как налоговые льготы и субсидии [12].
- Проект «Сарань» – крупнейшая солнечная электростанция мощностью 100 МВт в Карагандинской области. Правительство оказывает поддержку в виде гарантированного закупа электроэнергии через программу QazaqGreen [13].
- Проект «Астана» – строительство солнечной электростанции мощностью 100 МВт вблизи столицы Казахстана Астаны. Правительство активно поддерживает этот проект, предоставляя земельные участки, субсидии на развитие и благоприятные условия для инвесторов [14].
- Программа «Зеленая энергия» – государственная программа, поддерживаемая Правительством РК и направленная на развитие возобновляемой энергетики. Она предусматривает льготное финансирование проектов в области солнечной и ветровой энергетики, включая субсидирование процентных ставок по кредитам [15].

Нормативно-правовые акты Республики Казахстан в области развития ВИЭ. В Казахстане принят ряд нормативно-правовых актов, направленных на создание благоприятных условий для развития возобновляемой энергетики. К ним относятся установление целевых показателей по увеличению доли ВИЭ в энергобалансе страны, упрощение процедур получения лицензий и разрешений на реализацию проектов в данной сфере, а также формирование нормативно-правовой базы, регулирующей развитие возобновляемой энергетики:

- Закон Республики Казахстан «Об энергосбережении и энергоэффективности» (2015 г.). Направлен на регулирование отношений в сфере энергосбережения и повышения энергоэффективности в различных секторах экономики, включая стимулирование использования возобновляемых источников энергии и реализацию мероприятий по энергосбережению.
- Закон Республики Казахстан «Об использовании возобновляемых источников энергии» (2009 г.), регулирующий отношения в сфере использования ВИЭ. Он регулирует отношения, связанные с солнечной, ветровой, гидроэнергетикой и другими видами ВИЭ, и закладывает правовую основу для проектов в этой области: порядок лицензирования, а также механизмы господдержки и стимулирования.
- План действий по развитию ВИЭ до 2030 года. Правительство определило в нем цели и меры по интеграции возобновляемой энергетики в

национальную систему. От поддержки инвестиций и обновления нормативной базы до развития инфраструктуры и подготовки кадров для отрасли.

- Постановление «О механизме поддержки развития возобновляемой энергетики» (2014 г.). Здесь закреплены конкретные инструменты поддержки, такие как финансовые механизмы, налоговые льготы, выделение земельных участков и другие меры для проектов в сфере ВИЭ.

Вместе эти документы формируют правовую основу отрасли. Они защищают инвесторов и разработчиков проектов, а заодно упрощают саму интеграцию ВИЭ в энергосистему страны.

Параллельно в стране реализуется ряд мер по энергоэффективности и энергосбережению. Они охватывают разные сектора экономики:

- *Субсидии и финансовые стимулы.* Государство компенсирует часть затрат на внедрение энергоэффективных решений. Это снижает порог входа для предприятий и мотивирует их пересматривать расход ресурсов [16].
- *Энергетический аудит.* Регулярный аудит показывает, где именно предприятие теряет энергию впустую, и помогает выстроить приоритеты для оптимизации [17].
- *Образование и осведомленность.* Через обучающие программы бизнес и граждане получают не только знания, но и практические навыки экономии энергии [18].
- *Технологические инновации.* Поддержку получают энергоэффективное оборудование [19], системы энергоменеджмента [20], а также технологии хранения энергии и энергосберегающие процессы [21].

Все это в комплексе показывает, что государство действительно вкладывается в развитие солнечной и ветровой энергетики: через финансовые инструменты, инвестиционные стимулы, землю под проекты, упрощенные разрешительные процедуры и понятную нормативную базу для инвесторов.

На этом фоне и глобальная, и казахстанская энергетика движутся в одном направлении — к интеллектуальному управлению энергосистемами. Именно поэтому дальше стоит разобрать, какие проблемы и технологические решения существуют сегодня в области Smart Grid.

По данным KEGOC, с 2013 по 2025 год сектор ВИЭ в Казахстане рос устойчиво, а в последние годы этот рост еще и ускорился. К 2022 году установленная мощность объектов ВИЭ достигла 2,4 тыс. МВт на 18,8% больше, чем годом ранее, и более чем в семь раз выше показателя 2017 года (см. рисунок 1.3).



Рисунок 1.3 – Динамика объемов выработки электроэнергии и доли выработки электроэнергии ВИЭ за 2013–2025 гг.

В структуре генерации доминировали солнечная и ветровая энергетика, причем основной прирост давали именно ветровые станции. Доля ВИЭ в общей выработке электроэнергии пока остается скромной. Но она стабильно растет, а значит, роль возобновляемых источников в энергобалансе страны постепенно усиливается.

Дополнительно следует отметить, что развитие сектора возобновляемой энергетики в Казахстане сопровождалось формированием среднесрочных и долгосрочных целевых ориентиров. Согласно стратегическим планам энергетического развития, доля ВИЭ в общем объеме выработки электроэнергии должна была достигнуть 7 % к 2026 году и 10 % к 2030 году за счет расширения солнечной и ветровой генерации.

В краткосрочной перспективе предусматривалось дальнейшее расширение мощностей: в 2026 году ввод в эксплуатацию 10 проектов ВИЭ суммарной мощностью около 245 МВт, что подтверждало сохранение инвестиционной активности в секторе. В долгосрочной перспективе прогнозировалось увеличение доли ветровой и солнечной энергетики до 15 % к 2035 году, что свидетельствовало о продолжении курса на декарбонизацию энергетического баланса страны.

1.3 Исследование текущих проблем Smart Grid и имеющиеся технологические решения

1.3.1 Проблемы внедрения интеллектуальных систем (Smart Grid)

Развертывание интеллектуальных электроэнергетических систем (Smart Grid) сопровождается рядом комплексных проблем, затрагивающих технические, организационные и нормативно-правовые аспекты их функционирования. Современные исследования показывают, что данные проблемы носят взаимосвязанный характер и существенно влияют на темпы внедрения и эффективность использования интеллектуальных сетей.

Внедрение Smart Grid сталкивается с целым рядом проблем, их удобно разбить на несколько направлений.

Одной из наиболее острых проблем выступает обеспечение безопасности и конфиденциальности данных. Smart Grid непрерывно собирает информацию о потреблении, состоянии сети и поведении пользователей. Однако, чем больше данных, тем выше риски, к примеру, несанкционированный доступ, утечки, кибератаки [22]. Защититься от этого можно только комплексно: криптография, аутентификация и авторизация, контроль доступа, анонимизация данных [23]. Но именно эта необходимость защищать каждый уровень системы, от конечных устройств до централизованных платформ, и делает архитектуру Smart Grid настолько сложной.

Вторая проблема — совместимость компонентов. В Smart Grid соседствуют устройства и подсистемы на разных протоколах и стандартах, и без единой унификации это оборачивается сложностями при обмене данными, падением надежности и ростом затрат на интеграцию. Решение здесь заключается в общих стандартах, протоколах и модели данных, которые заставят разнородные элементы сети работать согласованно. Кстати, эта проблема напрямую пересекается с безопасностью, поскольку чем разнороднее система, тем сложнее ее контролировать и защищать централизованно.

В качестве третьей проблемы следует выделить значительный объем генерируемых данных. Их генерируют умные счетчики [24], IoT-устройства [25], системы мониторинга и внешние сервисы [26], и этот поток нужно где-то хранить и как-то обрабатывать. Отсюда потребность в облачных и распределенных решениях, а также в аналитике, моделировании и прогнозировании. Но чем больше данных, тем выше требования к их защите и нагрузка на вычислительную инфраструктуру. Поэтому управление данными и стало одной из центральных задач для интеллектуальных энергосистем.

Четвертой проблемой служит надежность инфраструктуры [27]. В отличие от классических энергосетей, здесь важна не только физическая, но и информационно-коммуникационная часть системы. Ограниченная пропускная способность каналов, риск сбоев при передаче данных, сложности эксплуатации в труднодоступных регионах добавляет уязвимостей.

Справляются с этим за счет расширения пропускной способности, резервных каналов связи и альтернативных решений вроде беспроводных сетей и автономного питания. В итоге надежность держится на трех вещах: избыточности, отказоустойчивости и постоянном мониторинге состояния системы.

Помимо технических аспектов, существенное значение имеет нормативно-правовая проблематика. Развитие Smart Grid должно укладываться в законодательство о защите данных, кибербезопасности и регулировании энергетики [28], но на практике законы часто не поспевают за технологиями, а это уже само по себе барьер для внедрения. Если добавить сюда разницу национальных стандартов, то интеграция решений на международном уровне усложняется еще больше. Известный путь решения один, донастраивать нормативную среду так, чтобы она балансировала между инновациями, безопасностью и интересами пользователей.

Наконец, есть и организационно-экономическая сторона: внедрение Smart Grid требует серьезных инвестиций, координации между участниками энергорынка и пересмотра моделей управления. Без поддержки государства и регуляторов эти барьеры преодолеть сложно [29].

Объединяет все эти проблемы комплексность. Ни одну не решить в одиночку, только на стыке технических, правовых и организационных подходов, при тесном взаимодействии всех участников энергетической экосистемы [30]. Без системного подхода устойчивое внедрение Smart Grid попросту не сработает.

1.3.2 Обзор технологических решений в интеллектуальных системах

Перечисленные в предыдущем пункте проблемы и подталкивают исследователей к поиску новых технологических решений, чтобы повышения эффективности, устойчивости и безопасности интеллектуальных систем.

Smart Grid — это распределенная инфраструктура, где информационно-коммуникационные технологии переплетены с управлением энергоресурсами. Ключевой задачей является управление потоками нагрузок так, чтобы система оставалась стабильной, теряла меньше энергии и подстраивалась под переменные условия потребления и генерации, особенно когда в игру вступают возобновляемые источники. Один из проверенных инструментов для анализа таких систем, теория массового обслуживания, а точнее ее раздел, теория телетрафика. Изначально она создавалась для телекоммуникационных потоков, но хорошо ложится и на энергетику [31, 32].

Методы телетрафика умеют формализовать поведение систем с множеством запросов и каналов обслуживания, моделировать очереди, время ожидания, потери. По своей природе это близко к тому, как управляют потоками энергии и данных в умных сетях. В работах [33, 34] эти методы применены к управлению электрическими нагрузками с возможностью

отложенного выполнения, то есть к снижению пиков потребления и стабилизации сети. Конкретно предлагается механизм отсрочки включения бытовых приборов. Он уравновешивает спрос и предложение, если система достаточно долго хранит данные о потреблении. Подход рабочий, поскольку сети действительно становятся устойчивее за счет адаптивного управления нагрузкой. Но у него есть цена: защита конфиденциальности пользователей и требования к телекоммуникационной инфраструктуре, которая должна выдерживать сбои и кибератаки.

На сегодняшний день экспоненциально растет число IoT-устройств, а вместе с ним растут объемы данных и требования к обработке запросов. Чтобы справляться с потоком сообщений и команд в IoT-средах, нужны сложные алгоритмы планирования и оптимизации качества обслуживания. Здесь помогают модели массового обслуживания, например, туманные вычисления (fog computing), которые распределяют нагрузку между локальными и удаленными узлами, снижая задержки и потери данных [35, 36]. Но у этих моделей есть обратная сторона, такая как высокая вычислительная сложность и необходимость постоянно адаптироваться под разнообразные и быстро меняющиеся сценарии применения IoT.

Отдельное направление заняло прогнозирование поведения и перемещений устройств с помощью цепей Маркова и глубокого обучения. В работах [22, 37] показано: рекуррентные нейросети в связке с марковскими алгоритмами повышают точность предсказания маршрутов и нагрузок, а это критично для своевременной реакции инфраструктуры. Правда, у таких подходов тоже есть ограничение, они ресурсоемки, и для инфраструктур с тысячами и сотнями тысяч устройств нужны более масштабируемые решения [30, 38]. Поэтому многие исследователи склоняются к более простой логике, такой как брать устойчивые базовые модели вроде теории массового обслуживания и дополнять их сложными алгоритмами там, где это оправдано без ущерба экономичности и надежности.

Теория графов дает свои инструменты для маршрутизации потоков электроэнергии и минимизации потерь в распределенных сетях. Общий принцип заключается в представлении энергосистемы в виде графа, в котором узлами являются генераторы, трансформаторы и потребители, а ребрами — линии электропередачи. Дальше в ход идут проверенные алгоритмы оптимизации, включая поиск кратчайших путей. Они учитывают топологию сети, ограничения по мощности и условия доставки, что особенно важно при росте доли распределенной генерации и изменчивом спросе [39].

В работах [40] и [41] для этого использован алгоритм оптимального потока мощности (OPF). Он ищет наилучшие маршруты передачи энергии с учетом технических ограничений. Алгоритм Дейкстры и его модификации при этом минимизируют суммарные потери энергии, снимая нагрузку с критических участков сети. Слабое место у большинства таких подходов то, что они завязаны на централизованное управление, а значит, хуже масштабируются и более уязвимы к сбоям [7, 42].

В работе [43] предложена альтернатива, распределенная архитектура на основе направленного ациклического графа (DAG). Она держит низкие задержки при передаче данных и устойчивость сети за счет отказоустойчивых протоколов маршрутизации. А значит хорошо ложится на децентрализованные Smart Grid, к которым сейчас движется отрасль.

Но и здесь есть открытый вопрос: как связать распределенные графовые архитектуры с экономическими транзакциями и защитой данных, например, через блокчейн. Большинство существующих решений эту связку не предусматривают, а значит, объединить маршрутизацию энергии с управлением финансовыми операциями в одной системе пока не получается. Это ограничивает их применимость на динамичном распределенном энергорынке [44, 45].

Блокчейн решает именно эту задачу. Он обеспечивает безопасность, прозрачность и децентрализацию транзакций. В классических энергосистемах учет и управление энергией централизованы, а это узкое место, поскольку выше риск мошенничества, ниже гибкость и прозрачность процессов. Блокчейн — распределенный реестр с неизменяемыми записями и автоматическим исполнением смарт-контрактов. Он снимает эти ограничения и открывает дорогу к одноранговой (P2P) торговле энергией и доверенной автоматизации спроса и предложения [44, 46].

В работах [44, 46] описаны платформы на Ethereum, где смарт-контракты обеспечивают безопасные и прозрачные транзакции между участниками сети. Это повышает автономность потребителей, снижает транзакционные издержки и ускоряет операции за счет децентрализованных алгоритмов. Распределенное хранение данных, например, через IPFS. Он экономично справляется с большими объемами информации, снижая нагрузку на сеть и повышая устойчивость к отказам [47].

Отдельно блокчейн применяют для управления программами реагирования на спрос и балансировки нагрузки [48, 49, 50]. Смарт-контракты автоматизируют энергетические профили, делая систему эффективнее и защищеннее. Но у решения есть цена, такая как высокая вычислительная нагрузка, задержки при обработке транзакций и затраты энергии на майнинг. Особенно критично это при интеграции с возобновляемыми источниками [51, 52]. Именно эти проблемы и подталкивают к разработке более легких архитектур и новых алгоритмов консенсуса.

Блокчейн также срастается с другими технологиями как глубоким обучением, цифровыми двойниками, IoT. Вместе они дают комплексные решения для кибербезопасности и устойчивости энергосистем [27, 53]. Такие гибридные системы неплохо справляются с обнаружением вторжений, предотвращением атак и аутентификацией устройств в реальном времени.

При всех успехах нерешенным остается масштабируемость, интеграция с физическим уровнем энергии, защита конфиденциальности данных. Большинство исследований фокусируется либо на экономике торгов и безопасности транзакций, либо на отдельных технических деталях. Однако

комплексного решения, которое объединило бы все это, пока немного. Отсюда и растущий интерес к разработкам, где блокчейн работает в связке с теорией графов и телетрафика, чтобы одновременно оптимизировать маршрутизацию энергии, управление нагрузками и торговые потоки, не жертвуя безопасностью и прозрачностью.

Сопоставление трех рассмотренных направлений показывает, что, несмотря на значительный прогресс в каждом из них, комплексная интеграция между ними остается недостаточной. Теория телетрафика хорошо работает для анализа и управления нагрузками, но редко пересекается с экономикой и распределенными вычислениями. Блокчейн обеспечивает безопасность и прозрачность транзакций, но обычно рассматривается в отрыве от физических процессов распределения энергии и оптимизации на уровне топологии сети. Теория графов эффективна в маршрутизации, но редко интегрирована с управлением транзакциями и не учитывает специфику децентрализованных энергорынков.

Отсюда вырисовывается проблема, что нет единой архитектуры, которая объединяла бы управление нагрузками, маршрутизацию энергопотоков и экономическое взаимодействие участников системы. Такая архитектура должна одновременно минимизировать потери, обеспечивать защищенность и прозрачность операций, но при этом оставаться масштабируемой и адаптивной к меняющимся условиям.

Именно это и определяет задачу данной работы. Построить модель, где теория телетрафика отвечает за качество обслуживания и управление нагрузками, теория графов за маршрутизацию при выборе генератора, а блокчейн за безопасный и децентрализованный учет энергетических транзакций. Ключевым элементом подхода является аппаратно-независимые смарт-контракты с проверяемыми on-chain расчетами. Это должно гарантировать прозрачность и честность процессов, снижать риск мошенничества и повышать эффективность сети в целом.

В результате объединение этих трех технологий в единой архитектуре и формирует интеллектуальную энергосистему следующего поколения, которая будет устойчивой, безопасной и эффективной в управлении распределенной генерацией и энерготорговлей.

Проведенный анализ систематизирует существующие подходы и их ограничения. Они обобщены в таблице 1.1

Таблица 1.1 – Систематизация современных научно-технических подходов в области интеллектуальных энергосистем и их ограничений

Подход/ Источник	**Предлагаемое решение**	**Характеристики / особенности**	**Ограничения**
[31, 32] (теория телетрафика)	Управление нагрузками в Smart Grid через методы теории массового обслуживания с использованием отсрочки и TCLS	Повышение устойчивости сети, оптимизация использования терминальных нагрузок, балансировка пиковых нагрузок	Требует масштабного сбора энергоинформации, высокая вычислительная сложность, проблемы с конфиденциальностью потребителей
[35, 36] (IoT и массовое обслуживание / fog computing)	Модели с туманными вычислениями для оценки времени отклика и управления потоком данных в IoT-энергосистемах	Снижение задержек, улучшение качества обслуживания, оптимизация распределения задач	Высокая сложность реализации, требования к инфраструктуре
[39, 40, 41] (теория графов и OPF)	Оптимизация маршрутизации потоков энергии с помощью алгоритмов OPF и поиска кратчайших путей	Минимизация потерь энергии, учет топологических, технических и экономических ограничений	Централизованное управление, ограниченная масштабируемость, недостаточная интеграция с экономическими процессами
[44, 45] (блокчейн и IoT)	Децентрализованные платформы на базе блокчейн и IoT для безопасного учета и управления энергетическими транзакциями	Прозрачность, безопасность, децентрализация, интеграция со смарт-контрактами	Высокие энергозатраты, задержки, масштабируемость, зависимость от инфраструктур 5G
[27, 37] (гибридные решения)	Интеграция блокчейн, глубокого обучения, цифровых двойников для повышения кибербезопасности Smart Grid	Автоматическое обнаружение вторжений, аутентификация, устойчивость системы	Сложность реализации, высокие вычислительные ресурсы
Обобщение существующих подходов (литературный анализ)	Интегрированная архитектура с аппаратно-независимыми смарт-контрактами, объединяющая телетрафик, теорию графов и блокчейн	Управление нагрузками в реальном времени, маршрутизация с минимизацией потерь, децентрализованное и проверяемое выполнение транзакций	Зависит от актуальной топологии, необходимость доработки для масштабирования и повышения производительности

Литературный обзор показывает, что современные интеллектуальные энергосистемы активно развиваются за счет применения различных технологических подходов, включая теорию телетрафика, теорию графов и блокчейн. Каждый из этих методов вносит значительный вклад в решение отдельных задач: теория телетрафика помогает эффективно управлять нагрузками и качеством обслуживания, теория графов обеспечивает оптимальную маршрутизацию и минимизацию потерь энергии, а блокчейн – безопасность, прозрачность и децентрализацию транзакций.

Вместе с тем анализ показывает, что существующие исследования зачастую фрагментарны и не охватывают всю сложность управления современными распределенными энергосистемами. Отсутствует интегрированный подход, способный обеспечить комплексную оптимизацию и безопасность работы Smart Grid. В этом контексте интеграция методов телетрафика, теории графов и блокчейн технологий рассматривается как перспективное направление разработки масштабируемых, надежных и эффективных систем управления энергией следующего поколения.

Выводы по главе 1

В первой главе рассмотрены основные теоретические положения, связанные с развитием интеллектуальных энергосистем и их ключевыми компонентами. Проанализированы концепция Smart Grid и особенности интеграции возобновляемых источников энергии, которые в современных условиях выступают одним из ключевых факторов трансформации мировой энергетики и перехода к низкоуглеродной экономике.

Показано, что развитие возобновляемой энергетики способствует снижению экологической нагрузки, повышению энергетической эффективности и диверсификации источников генерации. Вместе с тем выявлены ограничения, обусловленные их стохастическим характером, зависимостью от природных условий, необходимостью внедрения систем накопления энергии и повышенными требованиями к устойчивости и гибкости энергосистем.

В разделе рассмотрены ключевые тенденции мировой и казахстанской энергетики как рост доли ВИЭ, цифровизация, внедрение интеллектуальных технологий управления энергосистемами. Отдельно показано, что Казахстан, обладая значительным потенциалом ВИЭ, последовательно выстраивает нормативную и инвестиционную базу для их развития и интеграции в национальную энергосистему.

Отдельно разобрана концепция Smart Grid как базовый инструмент для интеграции распределенной генерации. Интеллектуальные сети дают двусторонний обмен данными и адаптивное управление нагрузками, а вместе с ними растут наблюдаемость, управляемость, надежность и эффективность энергосистемы в целом.

Обзор литературы также систематизирует научно-технические подходы к моделированию и управлению системами, начиная с теории массового обслуживания и теории графов до технологий Интернета вещей и блокчейн решений. Установлено, что каждый из рассмотренных подходов эффективно решает отдельные задачи управления энергосистемой, однако в целом наблюдается их фрагментарность и недостаточная междисциплинарная интеграция.

Таким образом, проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что существующие научные и прикладные решения в области Smart Grid не обеспечивают комплексного подхода к управлению потоками энергии, нагрузками и координации взаимодействия участников энергосистемы. Это обуславливает необходимость разработки интегрированных архитектур интеллектуальных энергосистем, объединяющих методы оптимизации режимов работы сети, управления нагрузками и обеспечения безопасного децентрализованного обмена данными и энергетическими транзакциями.

Выявленные ограничения существующих подходов требуют дальнейшего рассмотрения и систематизации методов и технологических основ построения интеллектуальных энергетических систем, направленных на повышение эффективности, устойчивости и масштабируемости Smart Grid.

2 МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Методы и технологические основы моделирования интеллектуальных систем основываются на междисциплинарном переносе математических и прикладных подходов из телекоммуникационных сетей в энергетическую сферу. В качестве базовых инструментов используются теория телетрафика и теория графов, позволяющие формализовать процессы генерации, передачи и потребления энергии как потоки заявок и взаимодействие узлов сетевой структуры. Дополнительно учитываются современные распределенные цифровые технологии, включая блокчейн механизмы, обеспечивающие децентрализованное и защищенное взаимодействие участников энергосистемы. Интеграция указанных подходов позволяет описывать интеллектуальные энергетические системы как сложные динамические сети с распределенными источниками генерации, накопителями и потребителями, а также разрабатывать методы их анализа, оптимизации и управления с учетом требований надежности, масштабируемости и эффективности функционирования.

2.1 Теория телетрафика

Теория телетрафика – направление телекоммуникационной инженерии, занимающееся анализом, моделированием и пониманием потоков трафика в сетях связи. Она включает в себя разработку математических моделей и

методов, используемых для описания поведения трафика и оценки производительности телекоммуникационных систем в различных условиях. Теория телетрафика служит базой для проектирования, оптимизации и управления сетями с целью обеспечения эффективных, надежных и качественных услуг связи.

В последние годы методы теории телетрафика получили развитие за пределами традиционных телекоммуникационных систем и стали применяться для анализа сложных потоковых процессов в распределённых энергетических системах. Это связано с тем, что процессы генерации, передачи и потребления энергии могут быть интерпретированы как поток заявок в сетевой инфраструктуре, обладающей ограниченными ресурсами и требованиями к качеству обслуживания.

История возникновения теории телетрафика связана с работами датского математика А. К. Эрланга в начале XX века. Им было введено понятие интенсивности трафика и разработаны первые математические модели, предназначенные для анализа производительности телефонных сетей. В результате были получены формулы, впоследствии названные формулами Эрланга – Erlang B и Erlang C.

Формула Erlang B вычисляет вероятность блокировки вызова в системе с конечным числом каналов, где заблокированные вызовы не ожидают, а отвергаются сразу. Она используется для оценки систем связи с коммутацией каналов, когда количество ресурсов ограничено. Именно по этой формуле рассчитывают, какую пропускную способность необходимо выделить на телефонные линии или каналы связи, чтобы обеспечить заданный уровень качества обслуживания [54].

Формула Erlang C является расширением модели с добавлением очереди. Она подходит для систем, в которых вызовы могут ставиться в очередь при занятии всех каналов, а вероятность ожидания и время в очереди учитываются при планировании ресурсов. Классический пример такой формулы являются контакт-центры, поскольку там важно заранее прогнозировать, сколько клиент будет ждать ответа оператора.

Указанные модели позволяют определить оптимальное соотношение между эффективностью обслуживания и затратами на его обеспечение. А если слишком широкий, то ресурсы простаивают и издержки растут без пользы.

После формул Эрланга теория телетрафика не остановилась в развитии. Ее адаптировали под современные цифровые сети с разными архитектурами и типами трафика. И было к чему адаптировать, поскольку мобильные устройства, IoT, мультимедийные сервисы обрушили на сети такой объем трафика, что старые методы анализа перестали справляться и понадобились новые модели и алгоритмы оптимизации.

Чтобы телекоммуникационные системы работали надежно и на высокой производительности, применяют разные методы управления трафиком. Суть их заключается в удерживании баланса между нагрузкой на сеть и качеством обслуживания. И вот здесь проявляется прямая аналогия с энергетикой,

поскольку вместо пакетов данных можно взять потоки электроэнергии, вместо запросов на передачу, потребительский спрос на ее использование [55].

Одним из таких методов будет формирование трафика (traffic shaping). Логика простая, входящий поток данных подгоняют под заданный профиль с нужными параметрами пропускной способности и задержки. За счет этого сглаживаются скачки нагрузки, а вероятность перегрузок и потери пакетов падает. Работает это обычно на границах сети и помогает соблюдать политики качества обслуживания и условия контрактов с пользователями.

Есть и более жесткий метод как полисинг трафика (traffic policing). Он отслеживает тот же поток, но действует иначе. Он не задерживает избыточные пакеты, а сразу отбрасывает их или помечает, если те превышают лимит. Такой подход дает более строгий контроль над использованием пропускной способности и справедливое распределение ресурсов между пользователями.

Одновременно с этим сети следят за перегрузками. Это отдельная задача, цель которой предотвратить сбои и аварии. Именно управление потоками данных и держит нужный уровень качества обслуживания (QoS), причем для совершенно разных сервисов, от голосовой связи до тяжелых мультимедийных приложений.

Когда речь заходит о сетях с коммутацией каналов, на первый план выходит распределение ресурсов. Здесь приходится держать в голове сразу несколько вещей: как ведет себя трафик, где в нем пики нагрузки, сколько нужно избыточности про запас и как система будет масштабироваться дальше. Модели, которые описывают закономерности поступления и обслуживания вызовов, дают возможность прогнозировать производительность сети заранее. А значит, снижать задержки и риск блокировок еще до того, как они возникнут.

Применимость данного подхода подтверждается практикой: магистральные интернет-сети уже применяют такие модели для управления растущими потоками данных, а облачные дата-центры применяют теорию очередей, чтобы снижать задержки и наращивать пропускную способность. На горизонте имеются квантовые сети, интеграция разнородных (гетерогенных) сетей и рост энергоэффективности [56].

В последние годы теория телетрафика шагнула и в энергетику. В частности, ее применяют для оптимизации распределения энергии в системах на возобновляемых источниках. Для этого строят математические модели, которые описывают, как энергия производится, распределяется и потребляется.

Рынок электроэнергии в такой модели выглядит как совокупность подсистем, где входящий поток заявок описывают как случайный пуассоновский процесс. Дальше распределительная система либо обслуживает заявку сразу, либо с задержкой. И задержка здесь бывает двух типов либо это отказ, когда все ресурсы заняты, либо накопление, где энергия просто оседает в хранилищах, например в аккумуляторах, пока не понадобится.

Здесь выделяют два типа систем распределения: с полным доступом, где ресурсы распределяются равномерно, и с приоритетами и ограничениями, где часть ресурсов зарезервирована под определенные категории заявок.

Само потребление энергии моделируют как поток заявок, а дальше в ход идет теория массового обслуживания в разных ее вариантах. Классика жанра модель M/M/1 (один сервер, одна очередь) и M/G/1 (обслуживание с произвольным распределением), а также системы с ограниченным числом каналов и фиксированной емкостью. Все эти модели давно и активно применяют для оптимизации распределения и хранения энергии.

На практике они дают вероятность сбоя, ожидаемое время обслуживания заявки и то, сколько ресурсов на самом деле нужно, чтобы держать заданный уровень качества.

Отдельной историей считается виртуальные электростанции (Virtual Power Plant, VPP). Это система, которая объединяет разнородные источники энергии, такие как ветровые, солнечные, гидроэлектростанции, вместе с накопителями и потребителями в единую сеть. Управляют всем этим централизованно, через информационные и коммуникационные технологии. Планируют и координируют потоки энергии между всеми подключенными объектами так, чтобы производство было оптимальным, а затраты минимальными [57].

По принципу функционирования VPP представляет собой единую управляемую систему, объединяющую множества мелких источников. Эффект получается такой же, как от крупной электростанции. Это дает сразу несколько преимуществ: распределенные источники используются эффективнее, систему легко масштабировать (просто подключая новые генераторы или потребителей), а снабжение энергией становится стабильнее, в том числе и для возобновляемых источников, которые сами по себе нестабильны.

Теория телетрафика встраивается в VPP через анализ энергетического трафика, нагрузка распределяется и меняется во времени. Это помогает заранее заметить периоды пикового потребления и спланировать под них работу генераторов и накопителей. А анализ потоков вместе с прогнозированием спроса в итоге дает возможность на эффективное распределение энергии и контроль над потенциальными перегрузками [58].

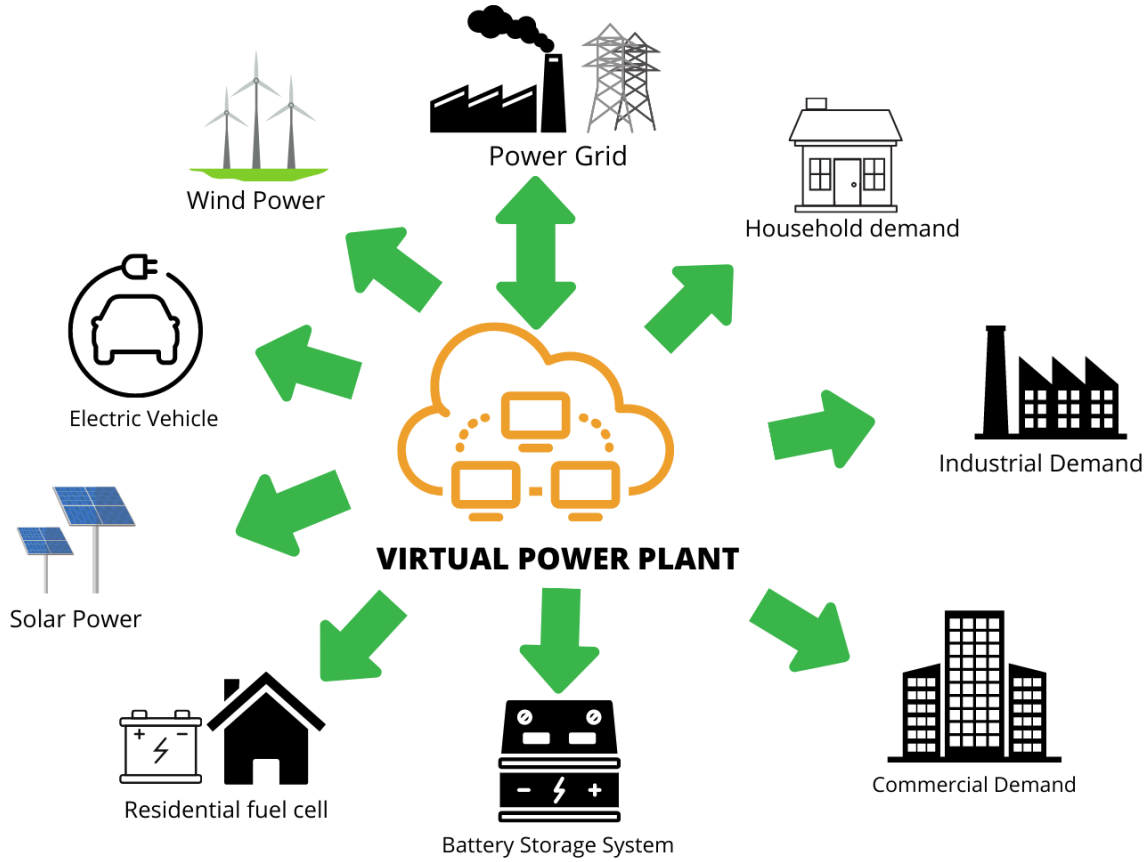

Рисунок 2.1 – Виртуальная электростанция [59]

Один из ключевых элементов управления в VPP может быть прямое управление нагрузкой. На практике это означает, что энергетическая компания или оператор VPP может дистанционно включать или отключать бытовые электроприборы в периоды пиковых нагрузок, чтобы сгладить спрос и не допустить сбоев в энергосистеме.

По сути, это напоминает контроль трафика в телекоммуникационных сетях, где запросы ресурсов откладывают или разрешают в зависимости от состояния сети. Особенно хорошо прямое управление нагрузками работает с термостатически регулируемыми приборами, такими как, кондиционеры, холодильники, водонагреватели. Они умеют накапливать тепловую энергию почти как батареи, а значит, могут гибко подстраивать свое энергопотребление.

Идут разработки и иерархических систем управления нагрузками. Контроллеры передают управляющие сигналы сразу на целые группы устройств. Так удается точно регулировать общее потребление, не предъявляя высоких требований к инфраструктуре связи и датчикам.

Отдельным вопросом стоит баланс между централизованным контролем и локальными решениями на стороне потребителей. Предлагаемые методы сочетают два режима: устройство либо запрашивает разрешение на включение у контроллера, либо принимает решение самостоятельно, ориентируясь на периодически транслируемые вероятности активации. Это позволяет

одновременно сохранить конфиденциальность пользователей и снизить трафик управляющих данных [60].

Для анализа повседневного управления энергопотреблением здесь предлагают использовать классические модели массового обслуживания из теории телетрафика. Так, модель M/M/v, где v обозначает число параллельных каналов или устройств, описывает взаимодействие между контроллером нагрузки и отдельными электроустройствами, или просьюмерами [61].

По данным исследований, такие модели помогают подобрать оптимальное число одновременно работающих приборов, а это в свою очередь предотвращает перегрузки сети, делает работу системы устойчивее и снижает издержки.

Но при всех успешных примерах и очевидных преимуществах классические модели теории телетрафика сталкиваются в энергосистемах и с рядом сложностей:

• *Высокая динамичность потребления энергии.* Энергетические нагрузки резко меняются под влиянием погоды, поведения пользователей и других факторов. Здесь нужны более гибкие и адаптивные модели, чем устойчивые сценарии, привычные для телекоммуникаций.

• *Непредсказуемость возобновляемых источников.* Ветровая и солнечная генерация сильно варьируется, а значит, прогнозировать и управлять ею с помощью классических моделей трафика становится сложнее.

• *Структурная сложность энергосистемы.* Распределенные энергосистемы являются совокупностью взаимосвязанных компонентов: генераторов, накопителей, потребителей, управляющих устройств. Такие мультикомпонентные иерархические системы плохо поддаются моделированию традиционными линейными методами.

• *Требования к безопасности и надежности.* Энергосистемы работают в условиях строгого регулирования, и ошибка в управлении может обернуться серьезными последствиями, а значит, модели с высокой степенью неопределенности здесь применять рискованно.

• *Инфраструктурные ограничения.* Чтобы внедрить методы теории телетрафика, часто приходится модернизировать коммуникационные каналы и устройства, а это высокие затраты и технические сложности.

Из-за перечисленных факторов политика внедрения моделей теории телетрафика требует использования междисциплинарных подходов, учитывающих специфику энергетического сектора и современные технологии управления.

Несмотря на сложности, во многих странах уже реализованы крупные проекты виртуальных электростанций, демонстрирующие практическую эффективность теоретических разработок:

- Компания cyberGrid (Австрия) создала виртуальную электростанцию с общей подключенной мощностью порядка 63 МВт, успешно управляя распределенными источниками энергии [62].

- Немецкая энергетическая компания RWE совместно с Siemens объединяет в VPP-объекты электрогенерации возобновляемых источников по Рейнско-Рурскому региону с мощностью около 80 МВт для продажи энергии на европейском рынке [63].
- В Австралии работает одна из крупнейших ВИЭ-станций на базе аккумуляторов Tesla, которая включает около 50 тысяч домохозяйств [64].
- Пригород Мюнхена объединяет энергосистемы примерно 20 тысяч домохозяйств в одну виртуальную электростанцию [65].
- На изолированном острове Гавайи создана VPP с подключением к энергосистеме около 3 200 домохозяйств [66].

В условиях резко континентального климата и большого суточного перепада температур, характерных, например, для Казахстана, актуальной задачей становится интеграция электрической и тепловой генерации в единую систему.

Виртуальная теплоэлектроцентраль (VHPP) объединяет тепло- и электрогенерацию с накоплением энергии и управлением нагрузками. Все это работает на основе информационно-коммуникационных технологий (ИКТ), которые обеспечивают централизованное управление и минимизацию затрат на производство тепловой и электрической энергии [67].

Одна из сильных сторон VHPP является гибкость. Система может преобразовывать избыточную электроэнергию в тепловую именно тогда, когда электричество дешевое, а тепло дорогое. Это повышает общую экономичность и дает больше свободы в диспетчеризации. А поскольку концепция изначально рассчитана на сильную неопределенность в генерации и потреблении, она заодно повышает устойчивость всей энергосистемы [68].

Теория телетрафика изначально создавалась для анализа и оптимизации телекоммуникационных систем, но со временем нашла применение и в распределенных энергетических системах, включая концепцию Smart Grid.

Классические модели, заложенные еще Эрлангом и позже развитые в теории массового обслуживания, дают мощный инструментарий. С их помощью анализируют потоки запросов, оценивают пропускную способность, вероятность отказов и оптимальное распределение ресурсов. Применительно к энергетике эти модели позволяют количественно описывать поведение современных сложных энергосетей, включающие с возобновляемыми источниками, системами накопления и гибким потреблением [69].

Теория телетрафика оказывается полезной и для создания виртуальных электростанций, и для управления виртуальными теплоэлектроцентралями. Она открывает новые возможности повысить эффективность, надежность и устойчивость энергосистем, особенно там, где высока динамичность и неопределенность, характерная для ВИЭ [70].

Методы управления нагрузками, заимствованные из телекоммуникаций, позволяют контролировать и балансировать потребление, сглаживая пики нагрузки и предотвращая аварии. А сочетание централизованного управления с

вероятностными локальными решениями дает баланс сразу по направлениям эффективности, конфиденциальности и технической реализуемости [71].

Но чтобы внедрить это на практике, одних технологий недостаточно. Нужны междисциплинарные исследования, адаптация моделей под специфику энергетики, а также развитие инфраструктуры и технологий сбора данных и коммуникаций.

На представленной ниже блок-схеме изображен входной модуль обработки заявок в системе с восемью параллельными каналами обслуживания (система M/M/8) и двумя классами заявок, разделенными по приоритету.

Слева на схеме показан источник заявок. Это IoT-устройства или другие генераторы трафика, формирующие поток запросов во входной модуль. Интенсивность прибытия заявок обозначается как λ и моделируется пуассоновским процессом с параметром λ, то есть количеством заявок в единицу времени.

Входящий поток разделяется по параметру ω, обозначающему долю заявок высокого приоритета (класс C1):

$\lambda_1=\omega A$ — интенсивность потока высокого приоритета,

$\lambda_2 =(1 - \omega)A$ — интенсивность потока низкого приоритета (класс C2),

$A= \lambda_1+ \lambda_2$ — интенсивность суммарного потока.

Такое разделение позволяет выделить критичные запросы с высоким приоритетом и обслуживать их отдельно от менее важных.

Центральным элементом схемы является система обслуживания с 8 одинаковыми параллельными логическими каналами (Канал 1… Канал 8), где каждый канал имеет экспоненциальное время обслуживания с параметром μ. Такая система соответствует классической модели массового обслуживания M/M/8, где входящий поток пуассоновский, с интенсивностью λ, а время обслуживания экспоненциальное, с интенсивностью μ, число каналов равно 8.

В момент времени t число занятых каналов обозначается как N(t), а коэффициент загрузки системы рассчитывается по формуле:

$$\rho = \lambda / (8\mu)$$

Логика принятия решений строится на текущем состоянии загрузки N(t). Если $N(t) < 8$, то в системе есть свободные каналы, входящие заявки любого класса принимаются в обслуживание и передаются на маршрутизацию для дальнейшей обработки.

Если же $N(t) = 8$, все каналы заняты, и включается приоритетное управление и заявки высокого приоритета (класс C1) помещаются в очередь ожидания, после истечения 5 мин, если энергия в генераторах не появилась, отклоняются. Заявки низкого приоритета (класс C2) отклоняются, что дает системе больше гибкости в использовании ресурсов.

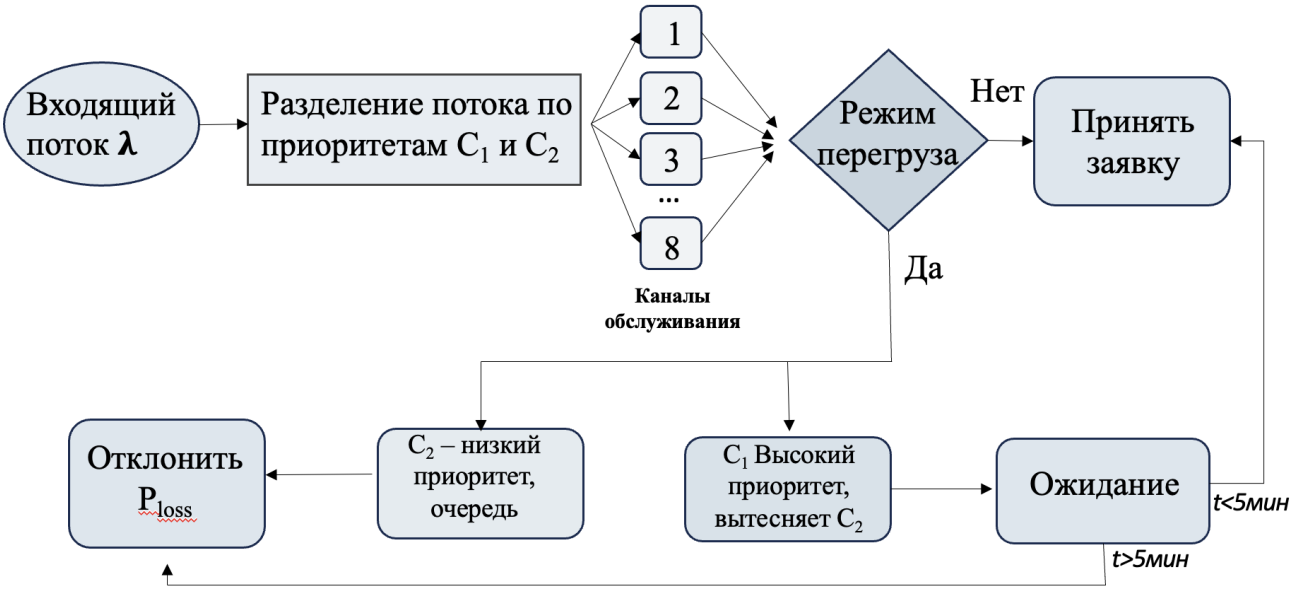

Рисунок 2.2 – Блок-схема приоритетного разделения трафика и управления отказами в системе с ограниченным числом ресурсов

Данная блок-схема реализует приоритетное разделение трафика и управление отказами в системе с ограниченным числом ресурсов. Она позволяет:

- Обеспечивать бесперебойное обслуживание важнейших (высокоприоритетных) заявок, что важно для задач реального времени [72].
- Максимизировать загрузку ресурсов за счет отклонения менее приоритетных заявок, минимизируя потери в высокоприоритетных заявках.
- Управлять уровнем загрузки системы, помещая в очередь высокоприоритетные заявки, что позволяет планировать пропускную способность и оптимизировать качество обслуживания [73].

Такое построение актуально в системах Smart Grid, где необходимо классифицировать запросы к ресурсам по приоритету, например различать критичные управляющие сообщения и второстепенные сервисные запросы, обеспечивая при этом эффективное распределение вычислительных и коммуникационных ресурсов.

Таким образом, методы теории телетрафика позволяют формализовать процессы поступления, обслуживания и распределения потоков в условиях ограниченных ресурсов. Однако для анализа сложных топологически распределенных систем требуется дополнение данных методов структурными моделями, основанными на теории графов, обеспечивающими описание связей между элементами системы и маршрутизацию потоков.

2.2 Теория графов в Smart Grid

Теория графов давно стала фундаментальным инструментом для работы с сетевыми структурами. С ее помощью интеллектуальные сети анализируют, моделируют и оптимизируют. В подобных сетях отдельные элементы представляют в виде вершин графа, то есть узлов, которыми могут выступать коммутаторы, маршрутизаторы, генераторы, серверные фермы или подстанции. Связи между узлами моделируются ребрами, или дугами, отражающими физические либо виртуальные коммуникационные линии, оптоволоконные каналы, линии электропередачи и другие каналы связи [74].

В основе теории графов лежит само понятие графа, множества вершин и соединяющих их ребер. Если направление передачи информации или энергии имеет значение, например при односторонней передаче данных или электроэнергии, граф называют ориентированным. Если направление не важно, граф считается неориентированным. Ключевую роль при маршрутизации играет понятие пути, конкретнее последовательности ребер, соединяющих начальную и конечную вершины. Особенно важен здесь кратчайший путь. Он достигается, когда суммарный вес ребер, отражающий «стоимость» прохождения маршрута (время задержки, финансовые затраты или потери электроэнергии), оказывается минимальным [75].

Оптимизация маршрутов с учетом затрат и потерь является одной из ключевых задач сразу в обеих сферах. В телекоммуникациях она снижает затухание сигналов и сокращает время передачи, а в энергетике уменьшает потери активной мощности при передаче на большие расстояния. Для этого каждому ребру присваивают весовой коэффициент, отражающий затраты или потери на конкретной линии, и дальше задача сводится к поиску пути с минимальным суммарным весом. Это и обеспечивает более эффективную и экономичную работу сети [76].

В телекоммуникационных системах теория графов помогает решать сразу несколько задач:

- планировать топологию сети с оптимальным расположением узлов [77];
- анализировать пропускную способность каналов и управлять нагрузкой;
- снижать задержки и перегрузки за счет выбора альтернативных маршрутов [78];
- реализовывать динамические стратегии маршрутизации. Например, в SDN (Software-Defined Networking), где графовые алгоритмы обеспечивают оперативное перераспределение трафика.

В энергетических сетях у графовых моделей похожая роль. Они позволяют:

- моделировать маршруты передачи энергии с учетом физико-технических ограничений;
- находить оптимальные маршруты с минимальными потерями и перегрузками;

• повышать устойчивость системы за счет резервирования альтернативных путей на случай отказов.

Снижать капиталовложения, выстраивая минимальные основные деревья, обеспечивающие связность всех узлов при наименьших инфраструктурных расходах [79].

На рисунке 2.3 показана диаграмма распределения мощности по линиям электропередачи. Узлы представлены в виде кругов, а направленные ребра отображают потоки активной мощности между узлами. Числовые параметры, нанесенные на ребра, указывают величины мощности в мегаваттах (МВт), протекающей по линии в определенном направлении. Это позволяет визуально и количественно оценить нагрузку различных участков сети и выявить потенциально перегруженные сегменты. Такой граф служит базой для вычисления весов ребер, используемых в последующих оптимизационных алгоритмах. В частности, на рисунке 2.3 можно увидеть, что центральный узел (оранжевого цвета) принимает потоки энергии от двух смежных верхних узлов, однако суммарно передает на следующий узел больше, чем получает, что указывает на наличие потерь или дополнительных потребителей.

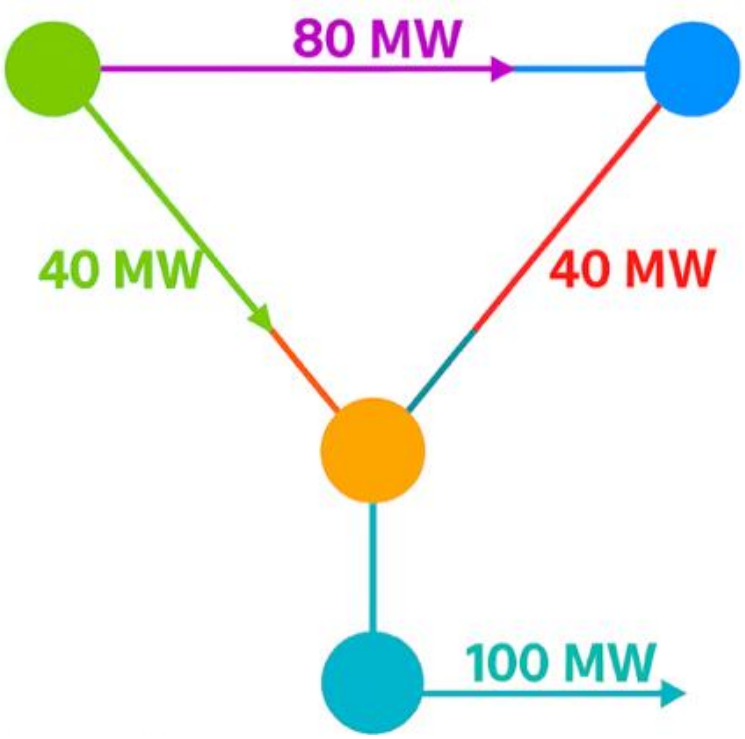

Рисунок 2.3 – Передача мощности и распределение нагрузки по сети электропередачи [80]

На рисунке 2.4 представлено распределение активных потерь мощности по линиям электропередачи, выраженное в единицах (p.u.). Горизонтальная полоса, разделенная на сегменты, дает величину потерь для каждой линии. Слева направо указаны значения потерь, постепенно увеличивающиеся от 0,0 до 0,3, что позволяет оценить существенность энергетических потерь по каждой

ветви сети. Эти данные играют роль входного набора для формирования весов ребер графа, которые затем используются в алгоритмах поиска кратчайшего пути – например алгоритме Дейкстры. Таким образом, граф становится взвешенным ориентированным, с весами, непосредственно базирующимися на реальных физических потерях энергии.

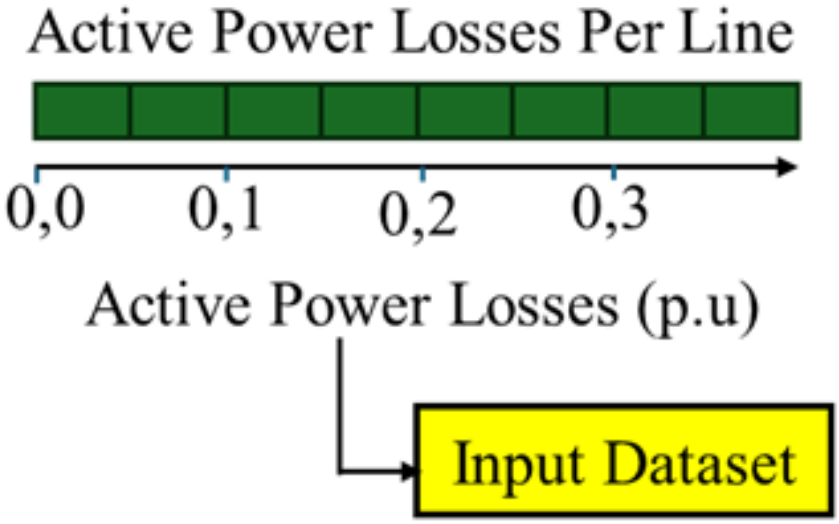

Рисунок 2.4 – Потери активной мощности по линиям, используемые для расчета весов алгоритма Дейкстры [80]

Алгоритм Дейкстры используется для поиска кратчайшего пути от одной начальной вершины до всех остальных в графе с неотрицательными весами ребер. Сначала для каждой вершины устанавливается расстояние до нее: для стартовой вершины – ноль, для остальных – бесконечность, поскольку путь до них пока не известен. Создается множество посещенных вершин, которое изначально пусто [81].

На каждом шаге выбирается не посещенная вершина с минимальным текущим расстоянием. Для каждого ее смежного соседа, который еще не посещен, вычисляется сумма расстояния до выбранной вершины и веса ребра к соседу. Если эта сумма оказывается меньше текущего известного расстояния до соседа, расстояние обновляется, а система запоминает, что именно текущая вершина предшествует соседу на кратчайшем пути. После этого выбранная вершина помечается как посещенная и в дальнейших шагах уже не рассматривается.

Эти шаги повторяются, пока остаются не посещенные вершины, до которых вообще можно дойти. В итоге для каждой такой вершины оказывается известно минимальное расстояние от начальной вершины. А если нужен сам кратчайший путь, а не только его длина, его легко восстановить: достаточно пройти обратно по сохраненным предшественникам от нужной вершины к стартовой [82].

Сам по себе алгоритм несложен в реализации, поэтому его применяют в самых разных областях — телекоммуникациях, транспорте, энергетике — везде, где важно найти оптимальный маршрут с минимальными затратами или потерями.

При всей эффективности графовых моделей в задачах маршрутизации и оптимизации потоков у них есть слепая зона: они не учитывают вопрос доверия и подтверждения корректности взаимодействия между участниками распределенной энергетической системы. Именно поэтому и требуются дополнительные цифровые технологии — такие как блокчейн, — способные обеспечить децентрализованную валидацию и автоматизацию этих процессов.

2.3Блокчейн технологии в интеллектуальных системах

Блокчейн технологии считаются одним из перспективных направлении развития интеллектуальных систем. Они делают возможным децентрализованное взаимодействие участников энергорынка, повышают прозрачность энергетических транзакций и автоматизируют сам процесс обмена энергией [83].

Ископаемое топливо для выработки электроэнергии несет с собой давно известную цену, как загрязнение окружающей среды и истощение природных ресурсов. Именно это и подталкивает к активному развитию экологически чистых альтернатив. Отсюда и растущий интерес к возобновляемым источникам энергии, таким как, солнечным панелям, ветровым установкам, а также когенерационным и полигенерационным системам на основе низкопотенциального тепла Земли. В результате потребители получают не только возможность покупать электроэнергию, но и продавать ее излишки. А это уже меняет саму традиционную модель взаимодействия производителей и потребителей [84].

По мере роста доли ВИЭ в энергетическом секторе традиционные централизованные системы вынуждены трансформироваться в децентрализованные и автоматизированные структуры, способные эффективно управлять большими потоками данных и снижать зависимость от посредников.

Блокчейн — это технология распределенного реестра. Изначально ее разработали для криптовалют, и суть в том, что данные хранятся в виде последовательной цепочки взаимосвязанных блоков. Информация о транзакциях попадает в реестр и становится доступной всем участникам сети. Благодаря этому механизму гарантируются прозрачность, надежность и неизменяемость данных [85].

Если в централизованной архитектуре управление сосредоточено в одной точке, то блокчейн предлагает принципиально другую децентрализованную модель с равноправными узлами. За счет этого исчезает единая точка отказа, а интеллектуальные энергосети (Smart Grid) становятся устойчивее, безопаснее и надежнее. Заодно появляется основа для

автоматизации энергетических транзакций и координации взаимодействия участников энергорынка [86].

В энергетике блокчейн открывает дорогу к одноранговой (P2P) торговле энергией. Потребители и производители обмениваются энергией напрямую, минуя посредников. Это снижает транзакционные издержки, повышает общую эффективность энергетической системы, а благодаря локальной балансировке спроса и предложения растет и гибкость, и устойчивость сети [87].

Смарт-контракты — это программные соглашения, условия которых исполняются автоматически, как только наступают заданные события. Благодаря этому автоматизируется заключение сделок и расчеты, а необходимость в ручном вмешательстве и связанные с ним операционные издержки заметно снижаются [88].

Чтобы понять место блокчейна в интеллектуальных сетях, стоит сопоставить его с традиционными централизованными подходами к управлению и хранению данных. На рисунке 2.5 как раз показано это концептуальное различие между централизованной базой данных и разрешенным блокчейном для маршрутизации в Smart Grid. В системе на базе данных единый центр управления контролирует все результаты маршрутизации, и здесь неизбежно возникает вопрос доверия [89]. Разрешенный блокчейн работает иначе, поскольку решения маршрутизации проверяют сразу несколько валидаторов, что обеспечивает прозрачность и делает маршруты передачи энергии с минимальными потерями практически неизменяемыми. Это сравнение наглядно показывает, зачем нужен децентрализованный уровень доверия, где в операциях интеллектуальной сети задействовано множество заинтересованных сторон [90].

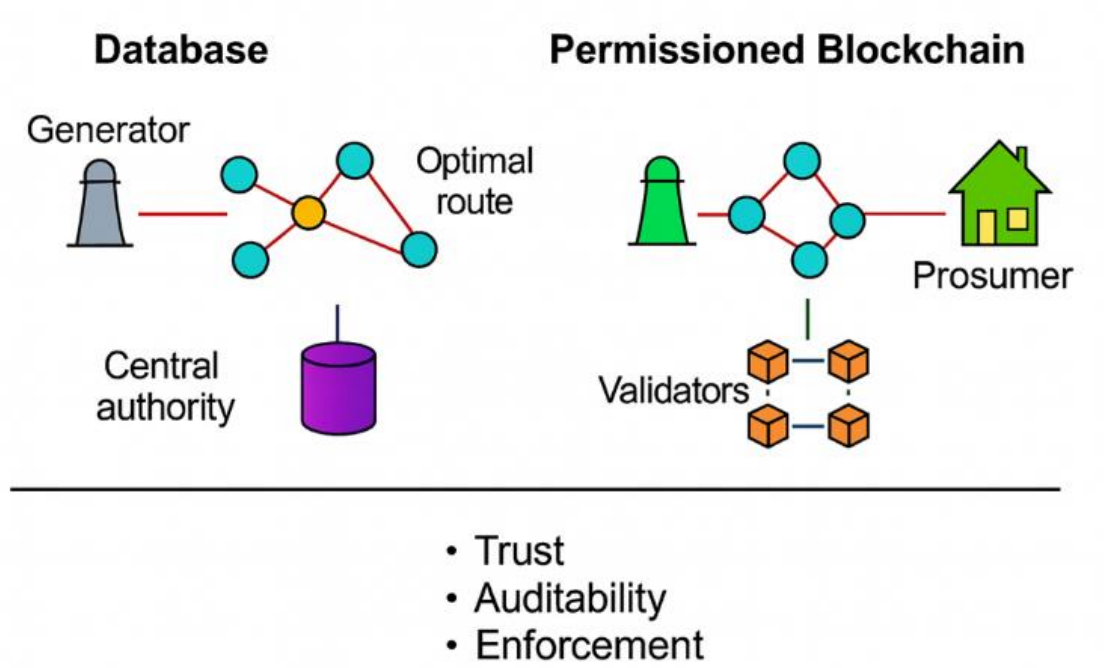

Рисунок 2.5 – Централизованная база данных и разрешенный блокчейн в маршрутизации интеллектуальных сетей [80]

У блокчейна, впрочем, есть и оборотная сторона. Классические публичные сети на основе Proof-of-Work требуют огромных вычислительных ресурсов и энергозатрат, которая является для энергетической отрасли скорее минусом, чем плюсом. Поэтому перспективнее выглядит переход к альтернативным консенсусным протоколам вроде Proof-of-Stake, а также к частным блокчейнам с авторизованными узлами.

Блокчейн системы в целом действительно уступают централизованным базам данных по задержке. Но в предлагаемом решении используется разрешенная сеть Proof-of-Authority (PoA). Она подтверждает транзакции в субсекундных интервалах, а этого вполне достаточно для работы Smart Grid в режиме реального времени [91].

Стоит учитывать и то, что надежность смарт-контрактов напрямую зависит от качества написанного кода. Ошибка в нем способна привести к серьезным последствиям. А автоматическое исполнение, при всех его плюсах, ограничивает возможность вмешаться, если возникнет непредвиденная ситуация. Внедрение блокчейн технологий сопряжено с существенными затратами, необходимостью обучения персонала, адаптации нормативно-правовой базы и интеграции с действующими информационными системами, что требует значительных организационных и финансовых ресурсов. Тем не менее долгосрочный потенциал повышения прозрачности, безопасности и эффективности в интеллектуальных сетях делает блокчейн перспективным инструментом, а продолжающиеся разработки по оптимизации и упрощению технологии способствуют снижению барьеров для ее внедрения [92].

На основе рассмотренных принципов может быть сформирована архитектура интеллектуальной системы, объединяющая методы графовой маршрутизации и блокчейн механизмы обеспечения доверия.

Предлагаемая структура маршрутизации и расчетов в Smart Grid использует блокчейн технологию как механизм обеспечения совместной работы множества частично доверенных участников, при котором все действия гарантированно проверяются и защищены от несанкционированного изменения. В частности, разрешенный (permissioned) блокчейн обеспечивает криптографическую защиту решений по маршрутизации, расчетам потерь и операциям в Smart Grid, исключая возможность подделки или искажения данных со стороны генераторов, просьюмеров или операторов [93]. Децентрализованный характер процесса консенсуса в блокчейн сети обеспечивает независимую валидацию транзакций узлами-валидаторами, что исключает единую точку отказа и снижает зависимость системы от централизованного управления [94]. Смарт-контракты, в свою очередь, автоматизируют соблюдение условий расчетов и платежей. Обязательства исполняются без человеческого вмешательства и без необходимости институционального доверия. А блокчейн в целом обеспечивает прозрачность, постоянный аудит и проверку корректности маршрутов энергоснабжения с минимальными потерями [95].

В этой системе блокчейн выполняет не роль универсальной базы данных, а роль уровня доверия. Он гарантирует целостность, справедливость и точность взаимодействия всех элементов сети. Это особенно важно в мультипользовательских средах, где у участников могут быть разные, порой противоречащие друг другу интересы.

Если сравнить централизованные базы данных с разрешенными блокчейн сетями, разница становится очевидной, поскольку в централизованной архитектуре функции управления и маршрутизации данных сосредоточены в едином узле, а в блокчейне проверку и подтверждение транзакций берет на себя распределенная сеть валидаторов. За счет этого растет прозрачность, а записи становятся неизменяемыми. Чтобы система работала в реальном времени, используется механизм консенсуса PoA. Он подтверждает транзакции с минимальной задержкой, которая как раз укладывается в требования интеллектуальных сетей [96].

Ключевую роль в рассматриваемой блокчейн архитектуре играют смарт-контракты. Именно они управляют жизненным циклом энергетических транзакций. Система запускается, когда поступает энергетический запрос от потребителя. Дальше проводится оптимизация потокораспределения в сети переменного тока с учетом потерь, а оптимальный маршрут передачи энергии определяется с помощью алгоритма Дейкстры. Валидаторами в консорциумной блокчейн сети выступают генераторы, просьюмеры и операторы распределительных сетей. Это снимает необходимость в централизованном маршрутизаторе и одновременно повышает прозрачность и устойчивость данных к подделке [97].

Механизм PoA дает высокую скорость подтверждения блоков и низкие вычислительные затраты, а для масштабных систем это критически важно. Смарт-контракты при этом хранят пары «генератор-потребитель», маршруты с минимальными потерями, объемы передаваемой энергии и временные метки, а заодно берут на себя регистрацию маршрутов, проверку потерь и выполнение платежей. Если оптимизировать код смарт-контрактов и сократить число операций записи в блокчейн, задержки снижаются, а транзакции выполняются быстрее. В итоге формализация взаимодействия через смарт-контракты дает автоматизированную, безопасную и прозрачную передачу энергии, а расчеты между участниками сети проходят мгновенно [98].

Пользовательский интерфейс системы дает участникам возможность контролировать стоимость энергии, маршрутизировать потоки и отслеживать состояние сети. А вместе с прозрачностью самого блокчейна это и складывается в современную децентрализованную платформу для сделок. Чтобы реализовать такую архитектуру на практике, нужно правильно выбрать блокчейн платформу и консенсусный механизм, которые обеспечат низкие задержки, масштабируемость и предсказуемость работы системы. Выбор пал на разрешенный блокчейн на базе Ethereum. Он гарантирует надежное и неизменяемое ведение записей при взаимодействии частично доверенных участников интеллектуальных сетей [99]. Консорциумная сеть допускает к

участию только авторизованных валидаторов, таких как генераторов, агрегаторов просьюмеров и операторов распределительных сетей. А для достижения консенсуса использует механизм Proof-of-Authority (PoA), который дает высокую скорость и низкие издержки подтверждения транзакций. Вычислительно сложные задачи, включая расчеты потокораспределения в сети переменного тока (AC load flow) и алгоритмы оптимизации, выполняются вне блокчейна (off-chain). Это повышает и масштабируемость, и производительность системы [100]. А в самом блокчейне фиксируются только результаты и подтверждения операций, что обеспечивает аудитируемость и неизменяемость записей и исключает их несанкционированное изменение.

Ethereum выбран во многом благодаря развитой инфраструктуре для разработки смарт-контрактов, а именно инструментам и библиотекам, которые позволяют эффективно тестировать и внедрять решения. А вот системы второго уровня (Layer-2) для задач интеллектуальных сетей подходят хуже. Их задержки и внешние зависимости плохо сочетаются с требованием предсказуемого и локального управления консенсусом и транзакциями.

Предлагаемая архитектура при этом стремится минимизировать объем данных, которые хранятся в блокчейне, используя его скорее как уровень доверия и механизм автоматического исполнения, поскольку это особенно важно там, где у участников разнонаправленные интересы и требуется прозрачный аудит. Стоит оговориться, хотя механизм Proof-of-Authority обеспечивает низкую задержку и детерминированность, в реальных условиях время подтверждения транзакций все же может колебаться под влиянием сетевых факторов и нагрузки [101]. И тем не менее предложенный подход в целом удовлетворяет требованиям современных систем управления, удерживая баланс между скоростью, безопасностью и надежностью.

Когда взаимодействие между генератором и потребителем формализуется через смарт-контракт в разрешенном блокчейне, соглашение получает безопасность, прозрачность и неизменяемость. Энергия передается узлу-потребителю, а платеж выполняется автоматически сразу же после активации смарт-контракта. После завершения транзакции система сбрасывается и снова готова обрабатывать новые запросы.

Отдельного внимания заслуживает пользовательский уровень взаимодействия. Именно он обеспечивает мониторинг, управление и выполнение транзакций в интеллектуальной энергосистеме. На рисунке 2.6 показана интерактивная система управления энергией на основе блокчейна. Слева на схеме расположен пользовательский интерфейс, через который участники получают информацию о стоимости энергии, маршрутизируют энергетические потоки и отслеживают состояние системы. В интерфейсе предусмотрены кнопки управления GET PRICE, ROUTE ENERGY и VIEW STATUS. Центральный элемент схемы, блокчейн, обеспечивает безопасность и децентрализацию взаимодействия участников, а также поддерживает целостность, прозрачность и достоверность данных за счет обработки транзакций и исполнения смарт-контрактов.

Справа от блокчейна расположена графическая сеть взаимосвязанных узлов, демонстрирующая процесс распределения энергии. Просьюмеры, обозначенные, например, розовым узлом P, одновременно генерируют и потребляют энергию. Поставщики коммунальных услуг контролируют распределение энергии и надежность энергосети через узел U. Узлы типа C представляют потребителей, не участвующих в генерации и лишь использующих энергию системы. Ячеистая топология сети обеспечивает динамическую маршрутизацию энергии посредством соединения узлов линиями, обозначающими пути передачи энергетических транзакций. В правом нижнем углу приведены условные цветовые обозначения различных типов участников сети.

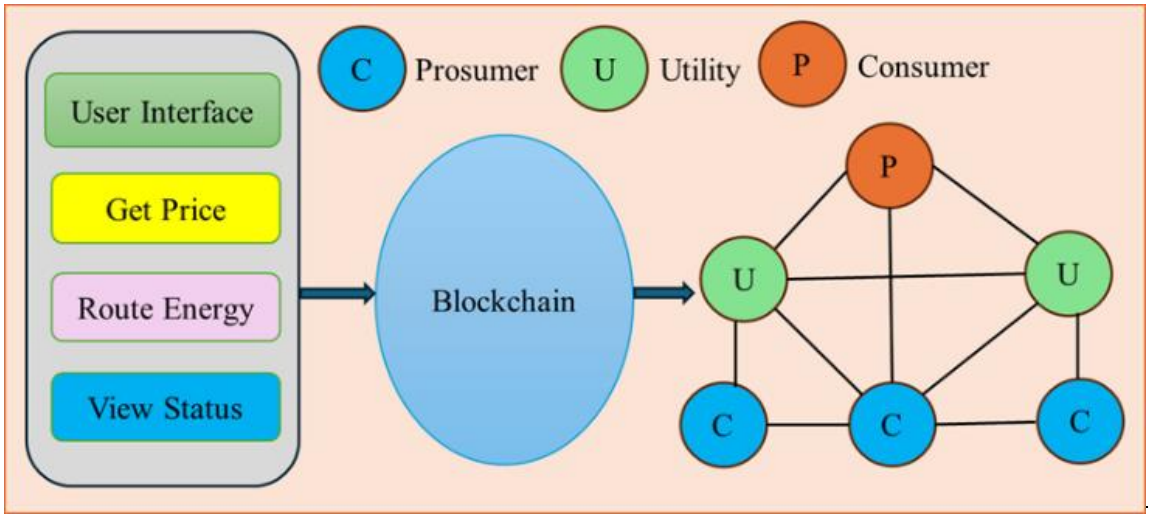

Рисунок 2.6 – Интерактивный пользовательский интерфейс предлагаемой системы маршрутизации на основе графов и блокчейна [80]

Рисунок иллюстрирует, как блокчейн обеспечивает бесшовные, прозрачные и децентрализованные энергетические транзакции между просьюмерами, поставщиками услуг и потребителями. В целом блокчейн архитектура трансформирует модель маршрутизации из автономного инструмента оптимизации в безопасную, полностью автоматизированную систему обмена энергией, верифицируемую распределенной сетью и предназначенную для использования в современных децентрализованных интеллектуальных сетях.

Внедрение блокчейн систем в интеллектуальные энергосети сопряжено с рядом практических задач, связанных с обеспечением совместимости с существующей инфраструктурой и действующими стандартами. Отдельной задачей стоит сохранить надежность и функциональность энергоснабжения, одновременно повышая прозрачность и эффективность взаимодействия участников рынка. Для этого интеграция блокчейн технологий требует удобных интерфейсов. Они должны обеспечивать мониторинг состояния сети, обмен

данными и управление энергетическими ресурсами, причем без необходимости в глубоких технических знаниях у пользователей [102].

Не менее важна и информационная безопасность. Ошибка в смарт-контракте или сбой валидации транзакций способны привести к финансовым потерям и нарушить работу всей системы. Снизить эти риски помогают многоуровневое тестирование, аудит кода и регулярное обновление программного обеспечения.

Есть и внешний вызов, к сожалению, нормативно-правовое регулирование пока не поспевает за технологией. Многие аспекты автоматизированных сделок на основе смарт-контрактов законодательно попросту не урегулированы. Добавьте к этому необходимость обучать персонал и пользователей, а также значительные первоначальные вложения в инфраструктуру и станет понятно, почему внедрение блокчейна остается непростым процессом, которому нужна поддержка и на государственном, и на корпоративном уровне [103].

При всех этих ограничениях и технических сложностях, у блокчейн технологий все же высокий потенциал для интеграции в интеллектуальные системы. Прозрачность всех совершенных транзакций растет, устойчивость к сбоям и отказам отдельных узлов повышается за счет самой децентрализации, а автоматизация расчетов снижает издержки, связанные с посредниками, и все это в конечном счете работает на экономическую эффективность всего сектора [104].

Неизменяемость записей и возможность проверить каждую сделку заодно упрощает контроль качества поставляемой энергии и позволяет быстрее выявлять нарушения или ошибки. Открывается и путь к масштабному внедрению распределенных ресурсов, локальных генераторов, накопителей энергии, потребителей, в единую устойчивую систему с динамической маршрутизацией и балансировкой нагрузок.

Если смотреть в перспективу, развитие блокчейн платформ может привести к новым моделям рынка. Участники будут гибко обмениваться энергией по прозрачным и объективным правилам, а смарт-контракты обеспечат быстрое и надежное исполнение договоренностей без бюрократии и задержек [105].

В целом блокчейн технологии можно назвать важным компонентом инновационного подхода к управлению интеллектуальными системами. Они способствуют переходу к более децентрализованной и эффективной модели. Насколько быстро они приживутся, зависит от сочетания технических, экономических и нормативно-правовых факторов, а также от того, насколько сами участники рынка готовы к новым моделям взаимодействия [106].

Параллельно продолжается работа над упрощением пользовательских интерфейсов, оптимизацией протоколов и развитием образовательной базы. Все это должно способствовать более широкому распространению блокчейн решений.

Выводы по главе 2

Вторая глава была посвящена теоретическим и технологическим основам построения интеллектуальных систем. В частности, тому, как в них интегрируются теория телетрафика, теория графов и распределенные цифровые технологии. Удалось показать, что концепции, изначально созданные для телекоммуникационных сетей, неплохо приживаются и в энергетике. С их помощью можно моделировать потоки энергии, анализировать сетевую нагрузку и оптимизировать взаимодействие между участниками системы.

Методы теории телетрафика, как показал анализ, позволяют изучать потоковые процессы в сетях Smart Grid и оценивать ключевые параметры их работы, такие как нагрузку, вероятность перегрузок, время ожидания, эффективность обслуживания. Причем сама аналогия работает, что энергетические потоки и запросы потребителей действительно можно интерпретировать как аналог телекоммуникационного трафика, а значит, методы систем массового обслуживания применимы для исследования устойчивости и производительности Smart Grid.

Отдельно обоснована роль теории графов как инструмента структурного представления интеллектуальной системы. Если представить энергосеть в виде взвешенного ориентированного графа, связи между генераторами, потребителями и линиями электропередачи формализуются, а значит, к ним можно применять алгоритмы поиска кратчайших путей для минимизации потерь мощности и выбора оптимального маршрута до генератора.

Наконец, анализ распределенных цифровых технологий показал, что блокчейн обеспечивает децентрализованное и защищенное взаимодействие между участниками системы, снимая необходимость в едином центре управления. Отдельное внимание уделено смарт-контрактам. Было изучено как они автоматизируют расчеты, фиксируют маршруты передачи энергии и обеспечивают прозрачность транзакций. Выявлено, что интеграция блокчейн технологий с графовыми методами маршрутизации создает основу для построения устойчивой и масштабируемой инфраструктуры Smart Grid.

Дополнительно обоснована роль off-chain модулей расчета потокораспределения мощности, позволяющих объединить вычислительную эффективность классических энергетических расчетов с неизменяемостью и проверяемостью блокчейн среды. Установлено, что применение разрешенных блокчейн сетей на основе механизма Proof-of-Authority обеспечивает предсказуемое время подтверждения транзакций и повышает пригодность системы для работы в режиме реального времени.

Таким образом, результаты второй главы формируют теоретическую и методологическую основу дальнейшего исследования. Полученные положения используются в третьей главе при разработке математической модели интеллектуальной системы, построении алгоритма маршрутизации энергии с минимальными потерями, интеграции блокчейн механизмов в процесс

управления, а также при реализации и экспериментальной оценке предложенной программной системы.

3 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ВХОДЯЩЕГО ПОТОКА И МАРШРУТИЗАЦИИ С БЛОКЧЕЙН ВЕРИФИКАЦИЕЙ

3.1.1 Основы теории телетрафика для моделирования входящего потока

Для построения математической модели телетрафика в исследуемой системе был использован классический подход теории массового обслуживания. Первоначально разработана модель M/M/v (по Кендаллу) с использованием формул Эрланга. Рассчитаны вероятности и среднеквадратичные отклонения. В основе модели лежит система с двумя параллельными каналами обслуживания: два маршрутизатора, два интеллектуальных прибора учета и 100 000 IoT-устройств. Обозначается такая система как M/M/2 поток заявок здесь подчиняется пуассоновскому распределению, а время обслуживания экспоненциальному.

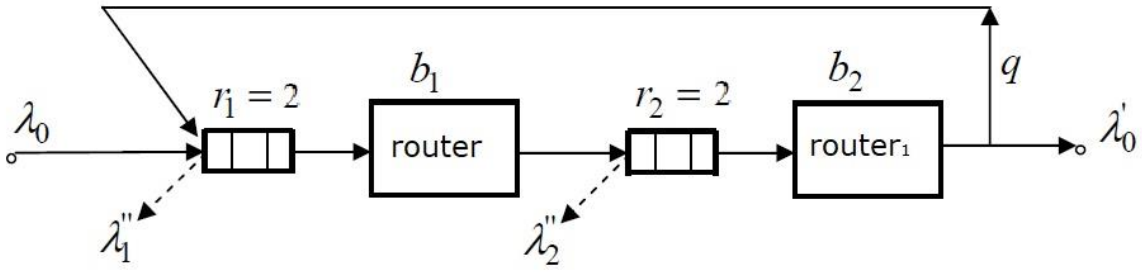

Рисунок 3.1 – Схема модели телетрафика M/M/2 для исследуемой IoT-системы [107]

Расчеты по этой модели дали три базовых показателя системы: вероятность занятости каналов, среднее время ожидания и вероятность отказа.

При заявленном числе активных IoT-устройств нужны два внешних канала на гигабитных портах — суммарная пропускная способность выходит на уровень 2 000 Мбит/с, или в среднем 0,5 Мбит/с на устройство. По обработке сигналов маршрутизаторы отличаются: Router справляется с двумя сигналами за 1 мс, а Router 1 уже с четырьмя за то же время.

Все узлы сети при этом рассматриваются как одноканальные системы массового обслуживания, отсюда условие K1=K2=1. Количество узлов в сети: n=2.» Очереди в узлах сети ограничены.

Размеченный граф переходов случайного процесса представлен на рисунке 3.2.

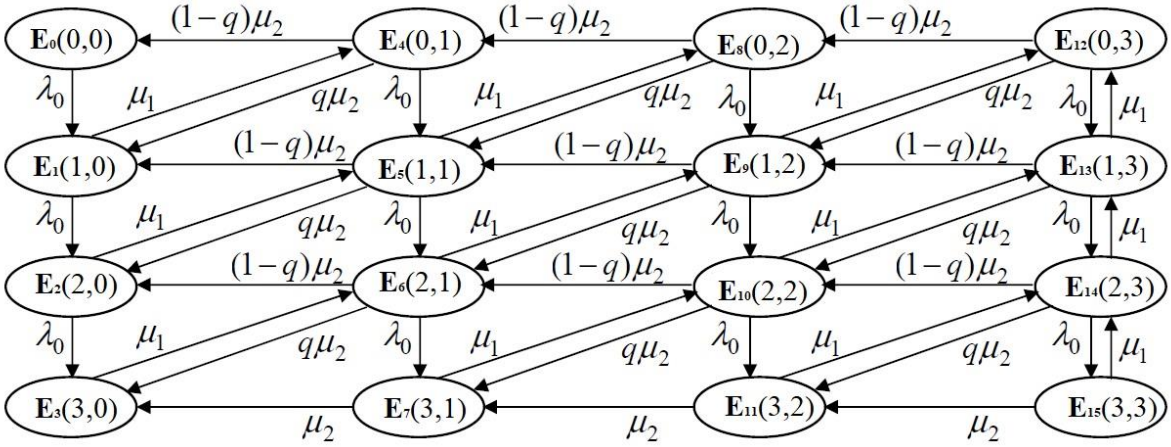

Рисунок 3.2 – Размеченный граф переходов состояний марковского процесса [107]

Для построения математической модели необходимо составить уравнение баланса.

Состояния системы:

E0: (0,0) – заявок нет;

E1: (1,0) – в узле 1 находится одна заявка (в устройстве).

E2: (2,0) – в узле 1 находятся две заявки.

E3: (3,0) – в узле 1 находятся три заявки.

E4: (0,1) – в узле 2 находится одна заявка.

E5: (1,1) – в узле 1 находится одна заявка и в узле 2 – одна заявка.

E6: (2,1) – в узле 1 находятся две заявки и в узле 2 – одна заявка.

E7: (3,1) – в узле 1 находятся три заявки и в узле 2 – одна заявка.

E8: (0,2) – в узле 2 находятся две заявки.

E9: (1,2) – в узле 1 находится одна заявка и в узле 2 – две заявки.

E10: (2,2) – в узле 1 находятся две заявки и в узле 2 – две заявки.

E11: (3,2) – в узле 1 находятся три заявки и в узле 2 – две заявки.

E12: (0,3) – в узле 2 находятся три заявки.

E13: (1,3) – в узле 1 находится одна заявка и в узле 2 – три заявки.

E14: (2,3) – в узле 1 находятся две заявки и в узле 2 – три заявки.

E15: (3,3) – в узле 1 находятся три заявки и в узле 2 – три заявки.

Всего 16 состояний.

Вероятность i-го состояния модели $p_i(t)$ определяется как вероятность того, что в момент времени t система находится в состоянии S_i. Для любого момента времени сумма вероятностей всех состояний равна единице:

$$\sum_{i=1}^{n} p_i(t) = 1. \qquad (3.1)$$

Правило составления системы уравнений Колмогорова [23] заключается в том, что в каждом уравнении системы в левой части записывается конечная вероятность данного состояния p_i, умноженная на суммарную интенсивность всех потоков, выходящих из этого состояния, а в правой части – сумма

произведений интенсивностей всех потоков, входящих в i-е состояние, на вероятности тех состояний, из которых эти потоки исходят.

При $t\to\infty$ вероятности $p_1(t)$ и $p_2(t)$ независимо от начального состояния системы стремятся к предельным значениям, которые называются стационарными вероятностями состояний.

$$\lim_{x\to\infty} p_i(t) = p_i, i = \overline{1,n}, \quad (3.2),$$

где n – конечное число состояний системы.

Вероятность того, что система находится в каждом состоянии, может быть записана следующим образом:

$$\frac{P_n(t)}{dt} = P_{n-1} + \left(1-(\lambda+\mu)\right)\times P_n + \mu \times P_{n+1} - \\ -P_n \times \left(\mu + 1 - (\lambda+\mu) + \lambda\right). \quad (3.3)$$

На основе приведенного правила для каждого состояния системы построена система уравнений, представленных на рис. 3.2 (формулы (3.4)–(3.19)).

Уравнения баланса:

$$p_0\lambda_0 = (1-q)\mu_2 p_6. \quad (3.4)$$

$$(\lambda_0+\mu_1)p_1 = q\mu_2 p_4 + (1-q)\mu_2 p_5 + p_0\lambda_0. \quad (3.5)$$

$$p_2(\lambda_0+\mu_1) = q\mu_2 p_5 + p_1\lambda_0 + (1-q)\mu_2 p_6. \quad (3.6)$$

$$p_3(\mu_1) = q\mu_2 p_6 + p_2\lambda_0 + \mu_2 p_7. \quad (3.7)$$

$$\left((1-q)\mu_2 + \lambda_0 + q\mu_2\right)p_4 = \mu_1 p_1 + (1-q)\mu_2 p_8. \quad (3.8)$$

$$\left((1-q)\mu_2 + \lambda_0 + q\mu_2 + \mu_1\right)p_5 = \\ = p_4\lambda_0 + q\mu_2 p_8 + \mu_1 p_2 + (1-q)\mu_2 p_9. \quad (3.9)$$

$$\left((1-q)\mu_2 + \lambda_0 + q\mu_2 + \mu_1\right)p_6 = \\ = p_5\lambda_0 + q\mu_2 p_9 + \mu_1 p_3 + (1-q)\mu_2 p_{10}. \quad (3.10)$$

$$(\mu_2+\mu_1)p_7 = p_6\lambda_0 + q\mu_2 p_{10} + \mu_2 p_{11}. \quad (3.11)$$

$$\left((1-q)\mu_2 + \lambda_0 + q\mu_2\right)p_8 = (1-q)\mu_2 p_{12} + \mu_1 p_5. \quad (3.12)$$

$$\left((1-q)\mu_2 + \lambda_0 + q\mu_2 + \mu_1\right)p_9 = \\ = p_8\lambda_0 + q\mu_2 p_{12} + \mu_1 p_6 + (1-q)\mu_2 p_{13}. \quad (3.13)$$

$$\left((1-q)\mu_2 + \lambda_0 + q\mu_2 + \mu_1\right)p_{10} = \\ = p_9\lambda_0 + q\mu_2 p_{13} + \mu_1 p_7 + (1-q)\mu_2 p_{14}. \quad (3.14)$$

$$(\mu_2+\mu_1)p_{11} = p_{10}\lambda_0 + q\mu_2 p_{14} + \mu_2 p_{15}. \quad (3.15)$$

$$((1-q)\mu_2+\lambda_0+q\mu_2)p_{12}=\mu_1 p_{13}+\mu_1 p_9. \quad (3.16)$$

$$((1-q)\mu_2+\lambda_0+q\mu_2+\mu_1)p_{13}=\mu_1 p_{14}+\mu_1 p_{10}+p_{12}\lambda_0. \quad (3.17)$$

$$((1-q)\mu_2+\lambda_0+q\mu_2+\mu_1)p_{14}=\mu_1 p_{15}+\mu_1 p_{11}+p_{13}\lambda_0. \quad (3.18)$$

$$(\mu_2+\mu_1)p_{15}=p_{14}\lambda_0. \quad (3.19)$$

Зная уравнения баланса, подставляются исходные данные. При этом используются следующие значения:

$$0.5p_0=(1-0.5)\times 4p_6. \quad (3.20)$$

$$2.5p_0=2p_4+(1-0.5)\times 4p_5+0.5p_0. \quad (3.21)$$

$$2.5p_0=4p_5+(1-0.5)\times 4p_6+0.5p_1. \quad (3.22)$$

$$2p_3=0.5p_2+4p_6+4p_7. \quad (3.23)$$

$$6.5p_4=2p_1+(1-0.5)\times 4p_8. \quad (3.24)$$

$$6.5p_5=0.5p_4+2p_8+2p_2+(1-0.5)\times 4p_9. \quad (3.25)$$

$$6.5p_6=0.5p_5+2p_9+2p_3+(1-0.5)\times 4p_{10}. \quad (3.26)$$

$$6p_7=0.5p_6+2p_{10}+4p_{11}. \quad (3.27)$$

$$4.5p_8=2p_5+(1-0.5)\times 4p_{12}. \quad (3.28)$$

$$6.5p_9=0.5p_8+2p_{12}+2p_6+(1-0.5)\times 4p_{13}. \quad (3.29)$$

$$6.5p_{10}=0.5p_9+2.5p_{13}+2p_7+(1-0.5)\times 4p_{14}. \quad (3.30)$$

$$6p_{11}=0.5p_{10}+2p_{14}+4p_{15}. \quad (3.31)$$

$$4.5p_{12}=2p_{13}+2p_9. \quad (32)$$

$$6.5p_{13}=2p_{14}+2p_{10}+0.5p_{12}. \quad (3.33)$$

$$6.5p_{14}=2p_{15}+2p_{11}+0.5p_{13}. \quad (3.34)$$

$$6p_{15}=0.5p_{14}. \quad (3.35)$$

Нахождение p_{15} из всех уравнений представлено в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Уравнения для нахождения p_{15}

p_i	p_i
$p_{14}=12p_{15}$	$p_9=3663.3p_{15}$
$p_{12}=1685p_{15}$	$p_7=1087.495p_{15}$
$p_{10}=0.04p_{15}$	$p_6=13012.42p_{15}$
$p_{11}=4.67p_{15}$	$p_8=11677.73p_{15}$
$p_{13}=127.9p_{15}$	$p_5=24589.8925p_{15}$
$p_3=32479.5994p_{15}$	$p_1=59074.072p_{15}$
$p_0=52049.68p_{15}$	$p_4=21769.7852p_{15}$
$p_2=17119.0776p_{15}$	

Известно, что сумма вероятностей всех состояний системы равна единице:

$$\begin{aligned}&21769.7852p_{15}+59074.072p_{15}+17119.0776p_{15}+\\&+52049.68p_{15}+32479.5994p_{15}+\\&+24589.8925p_{15}+11677.73p_{15}+13012.42p_{15}+\\&+1087.495p_{15}+3663.3p_{15}+127.9p_{15}+\\&+4.67p_{15}+0.04p_{15}+1685p_{15}+12p_{15}=1.\end{aligned} \tag{3.36}$$

Формула (3.36) является уравнением баланса для данной системы из 16 состояний, рассчитанным по формуле (1). На основе полученного уравнения баланса (3.36) была вычислена вероятность p_{15}=0,0000042.

Коэффициент использования узлов:

$$\begin{aligned}&\rho_1=p_1+p_2+p_3+p_5+p_6+\\&+p_7+p_9+p_{10}+p_{11}+p_{13}+p_{14}+p_{15}.\end{aligned} \tag{3.37}$$

$$\begin{aligned}&\rho_2=p_4+p_5+p_6+p_7+p_8+\\&+p_9+p_{10}+p_{11}+p_{12}+p_{13}+p_{14}+p_{15}.\end{aligned} \tag{3.38}$$

Коэффициент простоя узлов:

$$\eta_1=1-\rho_1. \tag{3.39}$$

$$\eta_2=1-\rho_2. \tag{3.40}$$

Среднее количество заявок в очереди:

$$l_1=p_2+p_6+p_{10}+p_{14}+2(p_3+p_7+p_{11}+p_{15}). \tag{3.41}$$

$$l_2=p_8+p_9+p_{10}+p_{11}+2(p_{12}+p_{13}+p_{14}+p_{15}). \tag{3.42}$$

Среднее количество заявок в узлах:

$$m_1 = l_1 + \rho_1. \quad (3.43)$$

$$m_2 = l_2 + \rho_2. \quad (3.44)$$

Эффективность узлов:

$$\lambda_1^{'} = \rho_1 \mu_1. \quad (3.45)$$

$$\lambda_2^{''} = \rho_2 \mu_2. \quad (3.46)$$

Вероятность потери заявок в узлах:

$$\pi_1 = 1 - \frac{\lambda_1^{'}}{\lambda_0 + q\lambda_2^{''}}. \quad (3.47)$$

$$\pi_2 = 1 - \frac{\lambda_2^{''}}{\lambda_1^{'}}. \quad (3.48)$$

Среднее время ожидания в узлах:

$$\omega_1 = \frac{l_1}{\lambda_1^{'}}. \quad (3.49)$$

$$\omega_2 = \frac{l_2}{\lambda_2^{''}}. \quad (3.50)$$

Среднее время пребывания заявок в узлах:

$$u_1 = \frac{m_1}{\lambda_1^{'}}. \quad (3.51)$$

$$u_2 = \frac{m_2}{\lambda_2^{''}}. \quad (3.52)$$

Характеристики сети:
– суммарный коэффициент использования узлов:

$$\rho = \rho_1 + \rho_2; \quad (3.53)$$

– общее количество заявок в очередях:

$$L = l_1 + l_2; \quad (3.54)$$

– общее количество заявок в узлах:

$$M = m_1 + m_2; \quad (3.55)$$

– эффективность системы массового обслуживания сети:

$$\lambda_0^{'} = (1 - q) \times \lambda_2^{''}; \quad (3.56)$$

– вероятность потери заявок в сети:

$$\pi = 1 - \frac{\lambda_0^{'}}{\lambda_0}. \quad (3.57)$$

На основе формул (3.1)–(3.57) с помощью математической модели системы управления IoT на основе теории телетрафика были рассчитаны все вероятности и представлены в таблице 2.

Таблица 3.2 – Рассчитанные вероятности p_i от 0 до 15

p_i	Data
p_0	0.21860866
p_1	0.24811111
p_2	0.07190013
p_3	0.13641432
p_4	0.0914331
p_5	0.10327755
p_6	0.05465216
p_7	0.00456748
p_8	0.04904647
p_9	0.01538607
p_{10}	0.00000017
p_{11}	0.00001961
p_{12}	0.007077
p_{13}	0.00053718
p_{14}	0.00005035
p_{15}	0.0000042

Расчетные характеристики узлов представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Расчетные характеристики узлов

Характеристика	**Обозначение**	**Значение**
Коэффициент использования узла 1	ρ_1	0.663492033
Коэффициент использования узла 2	ρ_2	0.32605134
Коэффициент простоя узла 1	η_1	0.3650967
Коэффициент простоя узла 2	η_2	0.67394866
Среднее число заявок в очереди № 1	l_1	0.40861556
Среднее число заявок в очереди № 2	l_2	0.07978978
Среднее число заявок в узле 1	m_1	1.04353589
Среднее число заявок в узле 2	m_2	0.40584112
Эффективность узла 1	—	1.26984066
Эффективность узла 2	—	0.65210268
Вероятность потери заявок в узле 1	π_1	0.46643214
Вероятность потери заявок в узле 2	π_2	0.48646889
Среднее время ожидания в узле 1	ω_1	0.32178491
Среднее время ожидания в узле 2	ω_2	0.12235769
Среднее время пребывания заявок в узле 1	u_1	0.82178491
Среднее время пребывания заявок в узле 2	u_2	0.62235769

Таблица 3.3 содержит расчетные характеристики шестнадцати состояний, включая данные о коэффициенте использования узлов 1 и 2, коэффициенте простоя узлов 1 и 2, среднем числе заявок в очередях № 1 и № 2, эффективности узлов 1 и 2, вероятности потери заявок в узлах 1 и 2, среднем времени ожидания в узле 1, среднем времени пребывания заявок в узле 1, суммарном коэффициенте использования узлов, общем числе заявок в очередях, эффективности системы массового обслуживания сети [107].

Полученные результаты объясняются успешным применением принципов теории телетрафика к системам управления IoT-устройствами. На основе данной теории авторами выполнены анализ и моделирование структуры трафика в сетях Интернета вещей, что позволило оптимизировать распределение ресурсов.

На основе размеченного графа переходов случайного процесса (рисунок 3.2) получены вероятности состояний системы от 0 до 15, представленные в таблице 3.2. Из таблицы 3.2 следует, что вероятности состояний p_i, определяющие маршруты заявок (рисунок 3.2), уменьшаются от 0 к 15. Это свидетельствует о снижении интенсивности потоков заявок λi по мере перехода от узла 0 к 15.

Согласно таблице 3.3, коэффициент использования узла 1 (ρ_1=0,663492033) почти в два раза превышает коэффициент использования узла 2 (ρ_2=0,32605134). Коэффициент простоя узла 1 (η_1 почти в два раза меньше, чем у узла 2 (η_2). По эффективности узел 1 почти вдвое опережает узел 2. При этом среднее время ожидания в нем (ω1) оказалось выше, чем в узле 2 (ω2).

Модель M/M/2 в целом дала хорошее представление о том, как ведет себя телетрафик в системе с двумя параллельными каналами, и позволила получить конкретные количественные оценки. Но чтобы приблизиться к реальным условиям работы сети и повысить пропускную способность, дальше стоит перейти к системе с большим числом каналов и более сложной логикой обработки запросов.

3.1.2 Расширенная модель M/M/V с двухуровневой системой приоритетов

Далее рассматривается модель (M/M/V) с восемью параллельными каналами обслуживания (V=8), что соответствует расширению аппаратных возможностей системы и позволяет обрабатывать более высокую нагрузку. Важной особенностью данной модели является введение двухуровневой системы приоритетов заявок, обеспечивающей дифференциацию обработки различных типов трафика и повышение качества обслуживания критически важных запросов.

Такое усложнение модели обеспечивает более реалистичное представление телетрафика в современных распределённых IoT-системах, где каналы обслуживания имеют различную значимость, а распределение нагрузки требует гибкого управления ресурсами.

Для расчетов мы взяли формулы теории телетрафика для смешанной системы обслуживания.

Вероятность того, что все операторы будут свободны от обслуживания [108]:

$$P_0 = \frac{V - \alpha_1}{\left[V - \alpha_1 + \alpha_1 \cdot E_V\left(\alpha_1 + \alpha_2\right)\right] \cdot N_V\left(\alpha_1 + \alpha_2\right)}, \tag{3.58}$$

где $\alpha_1=\lambda_1/\mu$ и $\alpha_2=\lambda_2/\mu$ – интенсивность нагрузки первого и второго типов; и V – количество контроллеров.

$$N_V\left(\alpha_1 + \alpha_2\right) = \sum_{k=0}^{V} \frac{\left(\alpha_1 + \alpha_2\right)^k}{k!},$$

$$E_V\left(\alpha_1 + \alpha_2\right) = \frac{\frac{\left(\alpha_1 + \alpha_2\right)^V}{V!}}{N_V\left(\alpha_1 + \alpha_2\right)}$$ – I формула Эрланга.

K – вероятность того, что контроллеры будут заниматься обслуживанием запросов. K определяется условием 0<k<V:

$$P_k = \frac{V - \alpha_1}{V - \alpha_1 + \alpha_2 \cdot E_V\left(\alpha_1 + \alpha_2\right)} \cdot \frac{\left(\alpha_1 + \alpha_2\right)^k}{k!} \cdot \sum_{k=0}^{V} \frac{\left(\alpha_1 + \alpha_2\right)^k}{k!}. \tag{3.59}$$

Если k>V, то P_k определяется по формуле (3.60):

$$P_k = \frac{(V-\alpha_1)\cdot E_V(\alpha_1+\alpha_2)}{(V-\alpha_1+\alpha_2)\cdot E_V(\alpha_1+\alpha_2)}\cdot\frac{\alpha_1^{(k-V)}}{V}. \quad (3.60)$$

Вероятность того, что время ожидания для запроса первого типа больше, чем время t, определяется по формуле (3.61):

$$P(>t) = P_{wait}\cdot e^{-(V-\alpha_1)\cdot\mu\cdot t}. \quad (3.61)$$

Среднее время ожидания первого типа запросов:

$$T_{wait} = \frac{P_{wait}}{\mu\cdot(V-\alpha_1)}. \quad (3.62)$$

Для оценки эффективности многоканальной системы обслуживания с двухуровневой системой приоритетов был проведен расчет вероятностных и временных характеристик при различных значениях интенсивности входного потока. Результаты моделирования представлены в таблицах 3.4–3.6 и на рисунках 3.3–3.5. Полученные данные позволяют проанализировать влияние нагрузки на степень занятости каналов обслуживания, вероятность потерь заявок второго приоритета, а также временные характеристики обработки заявок первого приоритета.

Таблица 3.4 собирает вероятностные характеристики системы M/M/V с двухуровневой системой приоритетов. Здесь и интенсивности поступления заявок — λ_{total}, λ_1, λ_2, — и приведенные нагрузки α_1, α_2, и суммарная нагрузка A. Отдельно указаны вероятность занятости всех каналов обслуживания $E_V(A)$ и вероятность потерь заявок второго приоритета P_{loss}.

Вместе эти показатели дают понимание того, насколько загружена система, и помогают увидеть, при каком росте интенсивности входного потока она начинает выходить на насыщение.

Таблица 3.4 – Вероятностные характеристики потерь заявок второго приоритета в системе (M/M/V) с двухуровневой системой приоритетов

A, Эрл	P_loss 0.5	P_loss 0.7	P_loss 0.9
3,000	0,010	0,011	0,012
3,500	0,022	0,024	0,028
4,000	0,040	0,046	0,054
4,500	0,066	0,077	0,093
5,000	0,099	0,118	0,147
5,500	0,138	0,168	0,216
6,000	0,182	0,226	0,299
6,500	0,229	0,291	0,397
7,000	0,279	0,360	0,506
7,500	0,330	0,432	0,626
8,000	0,381	0,507	0,755

На рисунке 3.3 показано, как меняется вероятность потери P_{loss} в зависимости от суммарной нагрузки системы A, при разных значениях параметров входного потока. Видно, что с ростом нагрузки увеличивается вероятность потери P_{loss} и система постепенно переходит в режим высокой загрузки.

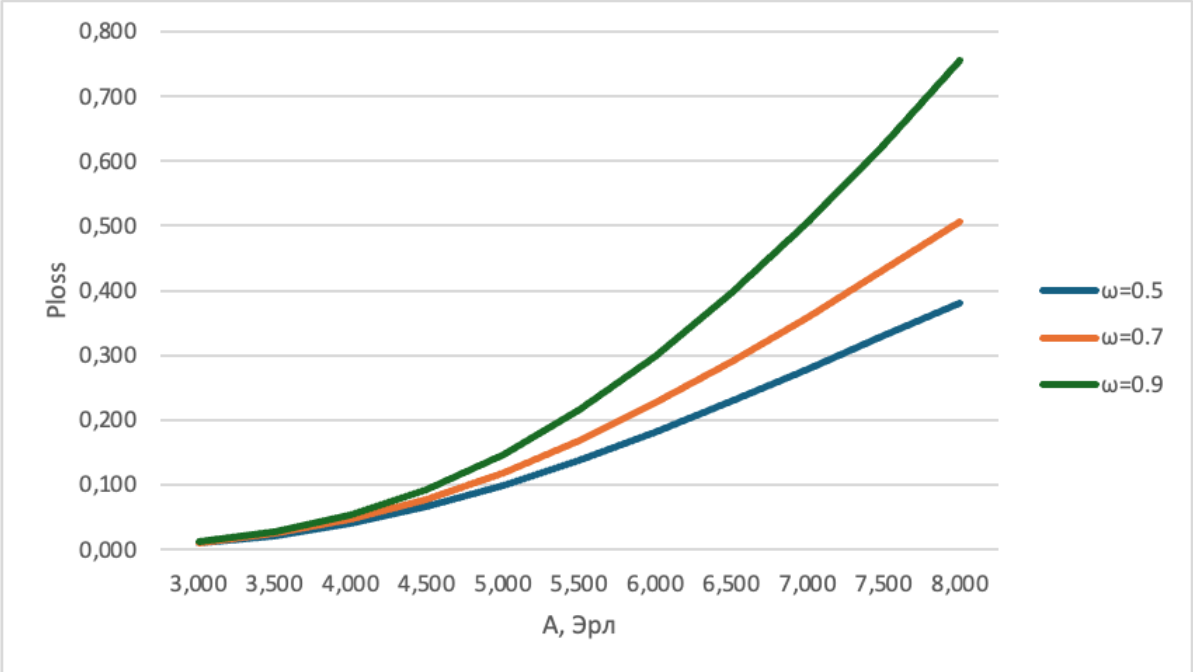

Рисунок 3.3 – Зависимость вероятности потерь заявок второго приоритета от суммарной нагрузки в модели (M/M/V) с двухуровневой системой приоритетов

Таблица 3.5 фокусируется на временных характеристиках обслуживания заявок первого приоритета в той же модели M/M/V с двухуровневыми приоритетами. Здесь среднее время ожидания заявок первого приоритета $T_{wait}(1)$, параметры нагрузки ω и k, интенсивности поступления заявок λ_1, λ_2, а также суммарная нагрузка A. Отдельно указана и вероятность занятости всех каналов обслуживания $E_V(A)$.

По этим данным можно проследить, как меняются временные задержки при разных уровнях входной нагрузки системы.

Таблица 3.5 – Временные характеристики обслуживания заявок первого приоритета в многоканальной системе (M/M/V) с двухуровневой системой приоритетов

A, Эрл	**T_wait 0.5**	**T_wait 0.7**	**T_wait 0.9**
3,000	0,138	0,168	0,208
3,500	0,312	0,395	0,516
4,000	0,602	0,797	1,104
4,500	1,032	1,433	2,123
5,000	1,616	2,362	3,777
5,500	2,362	3,646	6,365
6,000	3,271	5,355	10,359
6,500	4,344	7,579	16,600
7,000	5,582	10,445	26,794
7,500	6,990	14,148	45,087

Дополнительно на рисунке 3.4 показана зависимость времени ожидания заявок первого приоритета T_{wait} от суммарной нагрузки системы. Наблюдается увеличение T_{wait} с ростом интенсивности входного потока, что связано с ограниченной пропускной способностью обслуживающих каналов.

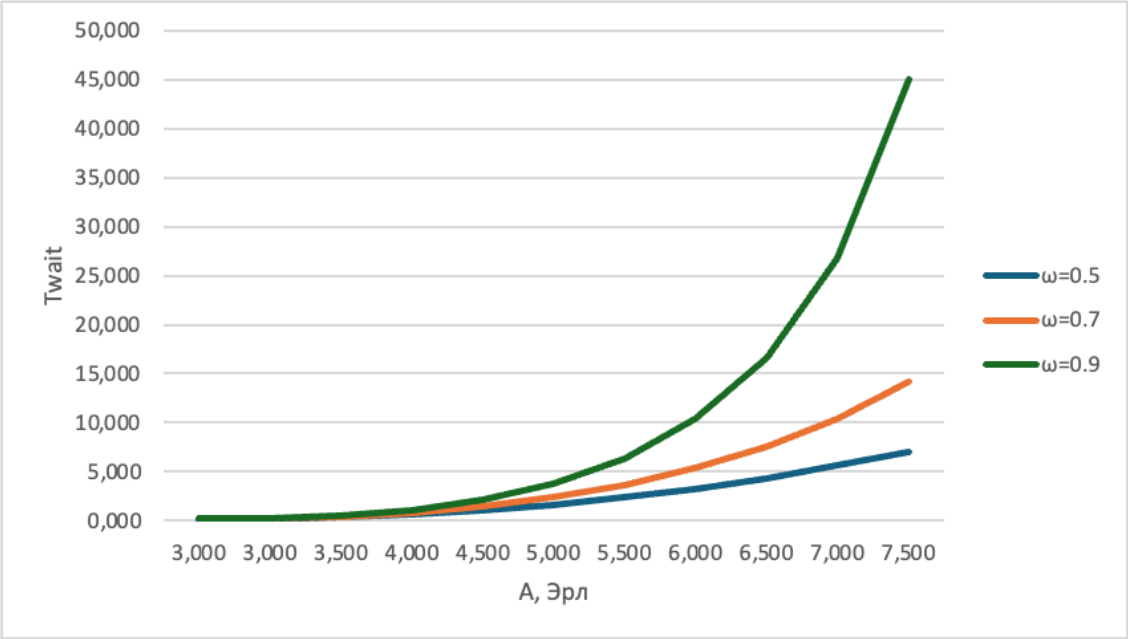

Рисунок 3.4 – Зависимость времени ожидания заявок первого приоритета от суммарной нагрузки системы в модели (M/M/V) с двухуровневой системой приоритетов

В таблице 3.6 представлены вероятностные характеристики превышения времени ожидания заявок первого приоритета в модели (M/M/V) с двухуровневой системой приоритетов. Рассматриваются параметры входного потока ω и k, приведенные нагрузки α_1 и α_2, суммарная нагрузка A, а также вероятность P(>t), характеризующая превышение заданного времени ожидания. Полученные данные позволяют оценить распределение времени ожидания заявок первого приоритета при различных уровнях загрузки системы.

Таблица 3.6 – Вероятностные характеристики превышения времени ожидания заявок первого приоритета в модели (M/M/V) с двухуровневой системой приоритетов

A, Эрл	**P(W>t) 0.5**	**P(W>t) 0.7**	**P(W>t) 0.9**
3,000	0,001	0,001	0,001
3,500	0,001	0,002	0,003
4,000	0,003	0,005	0,008
4,500	0,005	0,009	0,016
5,000	0,009	0,016	0,031
5,500	0,013	0,027	0,056
6,000	0,020	0,042	0,094
6,500	0,028	0,063	0,153
7,000	0,038	0,091	0,238
7,500	0,050	0,127	0,359
8,000	0,064	0,174	0,529

На рисунке 3.5 представлена зависимость среднего времени ожидания заявок первого приоритета T_{wait} от суммарной нагрузки A. Наблюдается увеличение времени ожидания при росте интенсивности поступающих заявок, что указывает на приближение системы к режиму перегрузки.

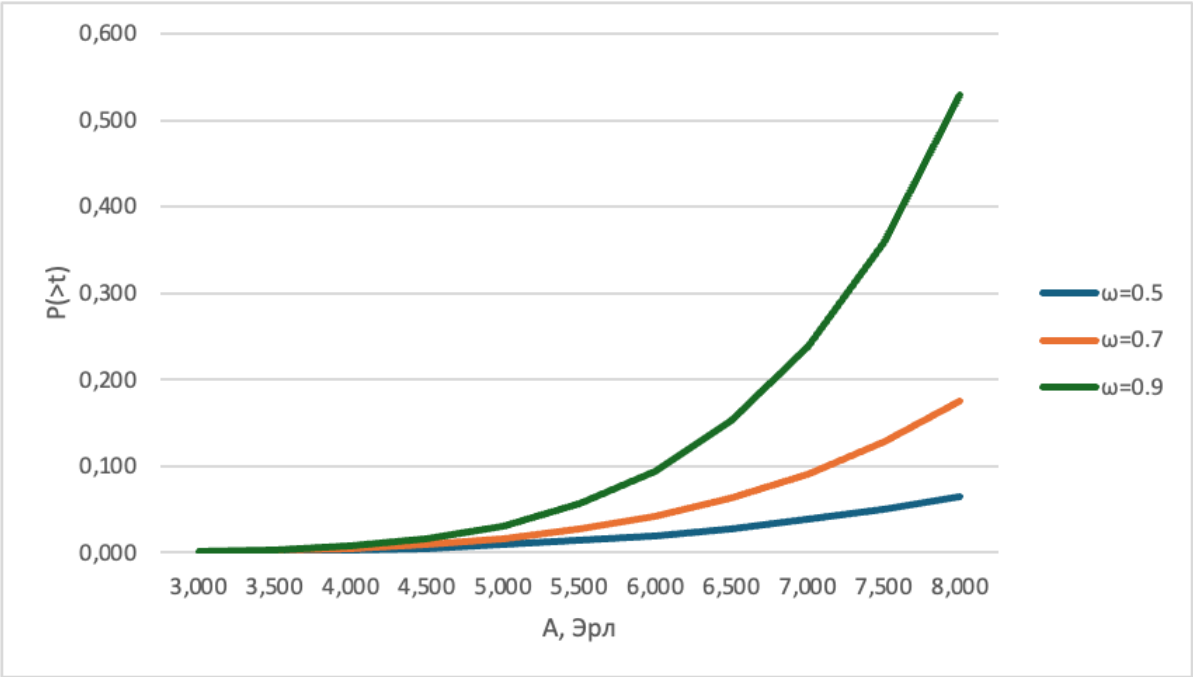

Рисунок 3.5 – Зависимость вероятностни превышения времени ожидания заявок первого приоритета от суммарной нагрузки системы в модели (M/M/V) с двухуровневой системой приоритетов

3.2.1 Моделирование установившегося режима в MatLab/ MatPower

Для реализации теории графов в рамках данного исследования был использован алгоритм Дейкстры, представляющий собой эффективный метод поиска кратчайших путей в графах с неотрицательными весами. Данный алгоритм является целесообразным для определения оптимального маршрута при выборе генератора с минимальными потерями, поскольку позволяет найти путь с наименьшей суммарной величиной веса, в нашем случае – с минимальными потерями активной мощности.

В качестве практического примера была использована топология энергетической системы из кейса 58, представленного в среде MatLab. В данном кейсе предварительно выполнены расчеты мощностей и потерь энергии для электрической сети, что обеспечивает репрезентативность исходных данных для моделирования и тестирования алгоритма. Использование данной топологии позволило реализовать алгоритм Дейкстры на основе реальных данных и подтвердить его эффективность в задачах оптимизации маршрутов передачи электроэнергии.

MatLab (Matrix Laboratory) — высокоуровневая интерактивная среда программирования от компании MathWorks. Ее выбирают там, где нужны серьезные математические вычисления, линейная алгебра, статистика, обработка сигналов и изображений, а заодно для разработки алгоритмов и моделирования сложных систем в инженерии и научных исследованиях.

Ключевом преимуществом среды является собственный язык программирования с простым и читаемым синтаксисом. От постановки задачи до ее реализации путь получается короче, чем во многих других средах. К этому добавляется большой набор встроенных функций начиная с математических вычислений до визуализации данных.

Строить можно что угодно, простые двумерные графики или же сложные трехмерные модели, что заметно упрощает работу с большими массивами данных. При этом MatLab не изолирован. Он интегрируется с C/C++, Java, .NET, Python, SQL, Hadoop, Excel, а под конкретные задачи есть специализированные наборы инструментов (Toolbox).

Неудивительно, что среду используют так широко, в автомобилестроении, аэрокосмической отрасли, финансах, биотехнологиях, медицине, машинном обучении, а также в университетах для обучения и исследований. В связке с Simulink она хорошо подходит и для моделирования динамических, мультидисциплинарных систем.

В этой диссертации MatLab применяется для вычислений и имитационного моделирования. И один из главных аргументов в его пользу — это специализированный пакет MatPower, заточенный именно под электроэнергетические системы.

MatPower — программный пакет на MatLab, разработанный в Корнеллском университете для планирования и анализа электроэнергетических систем. Его одинаково активно используют в науке, в промышленности и в исследованиях. Прежде всего для расчета установившихся режимов сети и решения задач оптимизации.

На практике это означает вычисление потоков мощности, уровней напряжения, потерь в линиях и других параметров сети. Есть и встроенные инструменты оптимизации, для экономической диспетчеризации, управления реактивной мощностью и планирования генерации с минимизацией затрат на производство электроэнергии.

Пакет умеет моделировать разные сценарии работы энергосистем. Помимо расчета установившихся режимов, MatPower применяют и для анализа устойчивости и надежности сетей: он помогает найти уязвимые элементы и выстроить стратегии управления режимами их работы.

Благодаря MatLab модели получаются гибкими и масштабируемыми. Их легко адаптировать под специфику конкретного проекта, в том числе там, где задействованы возобновляемые источники энергии и блокчейн технологии. А встроенная визуализация делает результаты вычислений наглядными, что упрощает и анализ данных, и принятие решений на их основе.

К преимуществу относится, точность вычислений. Она обеспечивает надежность результатов даже при исследовании сложных инженерных систем. Развитый инструментарий и автоматизация вычислительных процессов заодно ускоряют разработку и тестирование моделей. А обширное сообщество пользователей вместе с хорошей документацией и обучающими материалами облегчает решение возникающих по ходу работы задач.

Данные о топологии сети как узлы, линии, потери, ограничения, которые дает MatPower, можно представить как взвешенный граф. Вершины соответствуют шинам энергосистемы, а ребра линиям электропередачи с весами, равными потерям активной мощности. Это и создает мостик между классическим моделированием энергосистем и графовым алгоритмом маршрутизации энергии, который используется дальше.

В итоге связка MatLab и MatPower дает мощный инструментарий для анализа, моделирования и оптимизации систем распределения энергоресурсов на основе ВИЭ, включая сценарии с децентрализованным управлением на базе блокчейн технологий.

В MatPower используются стандартные модели установившихся режимов электроэнергетических систем, включая как модели переменного тока, так и упрощенные модели постоянного тока. Все величины приводятся к единой системе единиц, а углы комплексных переменных выражаются в радианах. Перед формированием моделей для расчета потоков мощности, оптимального потока мощности и связанных задач из модели исключаются внешние генераторы и шунтирующие элементы, после чего осуществляется последовательная нумерация узлов, начиная с единицы. Благодаря эффективной обработке матриц и векторов в MatLab указанные модели и уравнения представляются в матричной и векторной форме [24].

Расчет потоков мощности (Power Flow Analysis) основывается на решении уравнений баланса мощности для каждого узла сети. Задача сводится к решению нелинейных алгебраических уравнений, для чего применяются численные методы, в частности метод Ньютона – Рафсона. В результате определяется распределение напряжений по узлам сети, а также распределение потоков активной и реактивной мощности.

Генератор моделируется как комплексная подача мощности по определенной шине. Для генератора i подача равна:

$$s^i_g = p^i_g + jq^i_g \tag{3.63}$$

Пусть $S_g = P_g + jQ_g$ будет $n_g = 1$ вектором генераторных вводов. MW и MVAr эквивалентны p^i_g и q^i_g и будут указываться как PG и QG. Разреженная матрица подключения генератора $n_b = n_g\ C_g$ может быть определена таким образом, что ее (i, j)-й элемент равен 1, если генератор j расположен на шине i, и 0 в противном случае. Вектор $n_b = 1$ всех вводов шины от генераторов затем может быть выражен как

$$S_{g,bus} = C_g + S_g \tag{3.64}$$

Генератор с отрицательным впрыском также может быть использован для моделирования распределяемой нагрузки.

Нагрузки постоянной мощности моделируются как заданное количество реальной и реактивной мощности, потребляемой на шине. Для шины i нагрузка равна:

$$s^i_d = p^i_d + jq^i_d \quad (3.65),$$

а $S_d = P_d + jQ_d$ обозначает вектор комплексных нагрузок $n_b = 1$ на всех шинах. MW и MVar эквиваленты для p^i_d и q^i_d и указаны как PD и QD соответственно строки i матрицы шин. Эти поля также могут принимать отрицательные значения для представления фиксированной (например, распределенной) генерации.

Нагрузки с постоянным сопротивлением и постоянным током не реализуются напрямую, но части с постоянным сопротивлением могут быть смоделированы как шунтирующий элемент. Отправляемые нагрузки моделируются как отрицательные генераторы и отображаются в S_g как отрицательные значения.

Подключенный к шунту элемент, такой как конденсатор или катушка индуктивности, моделируется как фиксированное сопротивление заземления на шине. Пропускная способность шунтирующего элемента на шине i задается как:

$$y^i_{sh} = g^i_{sh} + jb^i_{sh} \quad (3.66)$$

и $Y_{sh} = G_{sh} + jB_{sh}$ обозначает вектор $n_b = 1$ допусков шунта на всех шинах. Параметры g^i_{sh} и jb^i_{sh}, указанные как GS и BS соответственно в строке i матрицы шин, эквивалентны значениям активной мощности (MW) и реактивной мощности (MVAr) при номинальном напряжении 1,0 p.u. и нулевом фазовом угле [109].

Шунтирующий элемент также может использоваться для моделирования нагрузки с постоянным импедансом, однако в текущей версии MatPower такие величины не учитываются отдельно как нагрузка.

Определение потерь в линиях (Line Losses) рассчитывается как разность между суммарной подаваемой мощностью и суммарной потребляемой мощностью с учетом активных и реактивных компонентов.

Линия передачи постоянного тока в MatPower моделируется с использованием двух связанных «фиктивных» генераторов. Как показано на рисунках 3.1 и 3.2, один из них с отрицательной мощностью извлекает активную мощность из сети на конце «отправление», а второй с положительной мощностью инжектирует ее в сеть на конце «прием». Поток активной мощности p_f на конце «отправление» определяется как отрицательное значение инъекции соответствующего «фиктивного» генератора, тогда как поток на конце «прием» p_t равен инъекции соответствующего генератора.

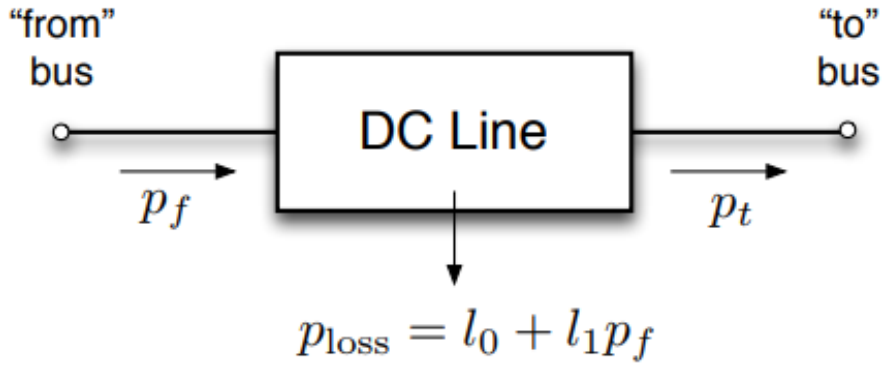

Рисунок 3.6 – Модель линии постоянного тока [109]

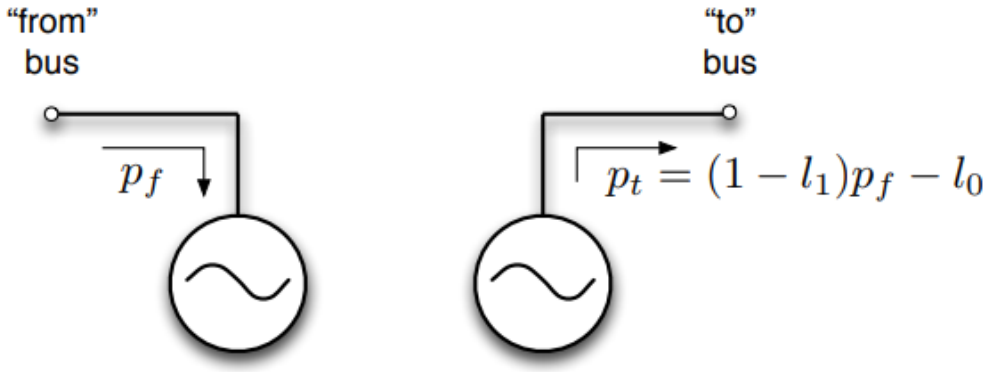

Рисунок 3.7 – Эквивалентные «фиктивные» генераторы [109]

MatPower связывает значения p_f и p_t, используя следующее соотношение, которое включает линейную аппроксимацию реальных потерь мощности в линии.

$$p_t = p_f - p_{loss} = p_f - (l_0 + l_1 p_f) = (1 - l_1)p_f - l_0 \quad (3.67)$$

Расчет лямбда-цен (Lambda Prices) связан с определением маржинальных затрат на производство электроэнергии. В контексте оптимизации распределения мощности лямбда-цена соответствует изменению в общих затратах системы при незначительном изменении спроса или предложения.

MatPower реализует механизм клиринга аукционов типа *smart market*. Цель данного подхода заключается в обработке набора заявок на покупку и предложений на продажу с использованием задачи оптимального потока мощности в MatPower для вычисления оптимального распределения мощности и соответствующих цен. Данный подход широко использовался авторами в сочетании с дополнительным пакетом MINOPF [23].

Для преобразования заявок на продажу и покупку в соответствующие мощности генерации и затраты используются две структуры данных – offers и bids. Каждая из них содержит поля P для активной мощности и Q для реактивной мощности (опционально). Кроме того, каждая структура включает матричные поля qty и prc, где элемент в i-й строке и j-м столбце соответствует объему и цене j-го блока мощности, заданного i-м генератором в offers или bids.

Блоки предложений должны располагаться в порядке возрастания цены, и предложение должно соответствовать генератору с $0 \leq P_{min} < P_{max}$. Набор ценовых ограничений может быть задан с помощью структуры lim, например предельная цена предложения на реальную энергию будет сохранена в предложении lim.P.max. Мощность, предложенная выше этой цены, считается не участвующей в аукционе и не включается в производимую функцию стоимости. Предложения должны быть в порядке возрастания цены и соответствовать генератору с $P_{min} < P_{max} \leq 0$. Нижний предел может быть установлен для ставок в lim.P.min bid.

Решение задачи OPF используется для определения объема использования каждого блока offers/bids и соответствующей цены. Оптимальные значения возвращаются в переменных co и cb, имеющих структуру, аналогичную структурам offers и bids. Параметр mkt представляет собой структуру, содержащую набор рыночных параметров, включая тип аукциона, тип задачи OPF (AC или DC) и ценовые ограничения. В рамках параметра mkt реализуются два основных типа ценообразования: дискриминационное и единообразное. Анализ различных вариантов единообразного ценообразования проводится в предположении идеализированной сети без ограничений и потерь. Данное распределение эквивалентно результату, который определяется как точка пересечения кривых спроса и предложения, построенных на основе соответствующих заявок на покупку и продажу.

Все узловые цены (λP), вычисляемые задачей OPF и возвращаемые в поле bus(:,LAM_P), соответствуют цене маржинального блока. Этот блок может быть либо последним принятым предложением (LAO – last accepted offer), либо последней принятой ставкой (LAB – last accepted bid), в зависимости от того, какая сторона является маржинальной, то есть определяется точкой пересечения стеков предложений и ставок. При дискретной структуре рыночных заявок между последней принятой ставкой и последним принятым предложением может возникать ценовой разрыв. Поскольку любая цена внутри этого диапазона является допустимой для всех участников рынка, возможны различные варианты установления равновесной цены.

Обобщение на сети с потерями и ограничениями приводит к формированию узловых цен λ_p, зависящих от топологии и местоположения узлов. Эти значения λ_P можно использовать для приведения всех ставок и предложений к эталонному местоположению путем умножения на коэффициент масштабирования местоположения. Для заявок и предложений на шине i этот масштабный коэффициент равен $\lambda^{ref}_p/\lambda^i_p$, где λ^{ref}_P – узловая цена на

базовой шине. Затем правило единообразного ценообразования применяется к скорректированным заявкам на покупку и продажу для определения единой цены на опорной (slack) шине. Далее эта цена корректируется с учетом местоположения узлов. В результате для всех принятых заявок и предложений используется единая цена, скорректированная по узловым условиям.

Для преобразования заявок на продажу и покупку в соответствующие мощности генерации и затраты используются две структуры данных – offers и bids. Каждая из них содержит поля P для активной мощности и Q для реактивной мощности (опционально). Кроме того, каждая структура включает матричные поля qty и prc, где элемент в i-й строке и j-м столбце соответствует, соответственно, объему и цене j-го блока мощности, заданного i-м генератором в offers или bids.

Блоки предложений должны располагаться в порядке возрастания цены, и предложение должно соответствовать генератору с $0 \leq P_{min} < P_{max}$. Набор ценовых ограничений может быть задан с помощью структуры lim, например предельная цена предложения на реальную энергию будет сохранена в предложении lim.P.max. Мощность, предложенная выше этой цены, считается не участвующей в аукционе и не включается в производимую функцию стоимости. Предложения должны быть в порядке возрастания цены и соответствовать генератору с $P_{min} < P_{max} \leq 0$. Нижний предел может быть установлен для ставок в $\text{lim.P.}_{\text{min bid}}$.

Решение задачи OPF используется для определения объема использования каждого блока offers/bids и соответствующей цены. Оптимальные значения возвращаются в переменных co и cb, имеющих структуру, аналогичную структурам offers и bids. Параметр mkt представляет собой структуру, которая задает ряд параметров рынка, тип аукциона, тип используемого OPF (AC или DC) и ценовые ограничения. В рамках этого параметра реализуются дискриминационное и единообразное ценообразования.

Проще всего объяснить логику единообразного ценообразования на примере неограниченной сети без потерь. В таком случае распределение эквивалентно результату, который определяется как точка пересечения кривых спроса и предложения, построенных на основе заявок на покупку и продажу.

Все узловые цены (λ_p), которые вычисляет задача OPF и возвращает в поле bus (:,LAM_P), соответствуют цене маржинального блока. Этим блоком может быть либо последнее принятое предложение (LAO), либо последняя принятая ставка (LAB). Какая сторона окажется маржинальной, определяет точка пересечения стеков предложений и ставок. При дискретной структуре рыночных заявок между последней принятой ставкой и последним принятым предложением может возникать ценовой разрыв. Поскольку любая цена внутри этого диапазона является допустимой для всех участников рынка, возможны различные варианты установления равновесной цены.

Обобщение на сети с потерями и ограничениями приводит к формированию узловых цен λ_p, зависящих от топологии и местоположения узлов. Эти значения λ_P можно использовать для приведения всех ставок и

предложений к эталонному местоположению путем умножения на коэффициент масштабирования местоположения. Для заявок и предложений на шине i этот масштабный коэффициент равен $\lambda^{ref}_p/\lambda^i_p$, где λ^{ref}_P – узловая цена на базовой шине. Затем правило единообразного ценообразования применяется к скорректированным заявкам на покупку и продажу для определения единой цены на опорной шине. Далее эта цена корректируется с учетом местоположения узлов. В результате для всех принятых заявок и предложений используется единая цена, скорректированная по узловым условиям [23].

В данной диссертационной работе мы использовали тестовый измененный кейс 58. Используются MatPower версии 7.1 и MIPS (MatPower Interior Point Solver) версии 1.4.

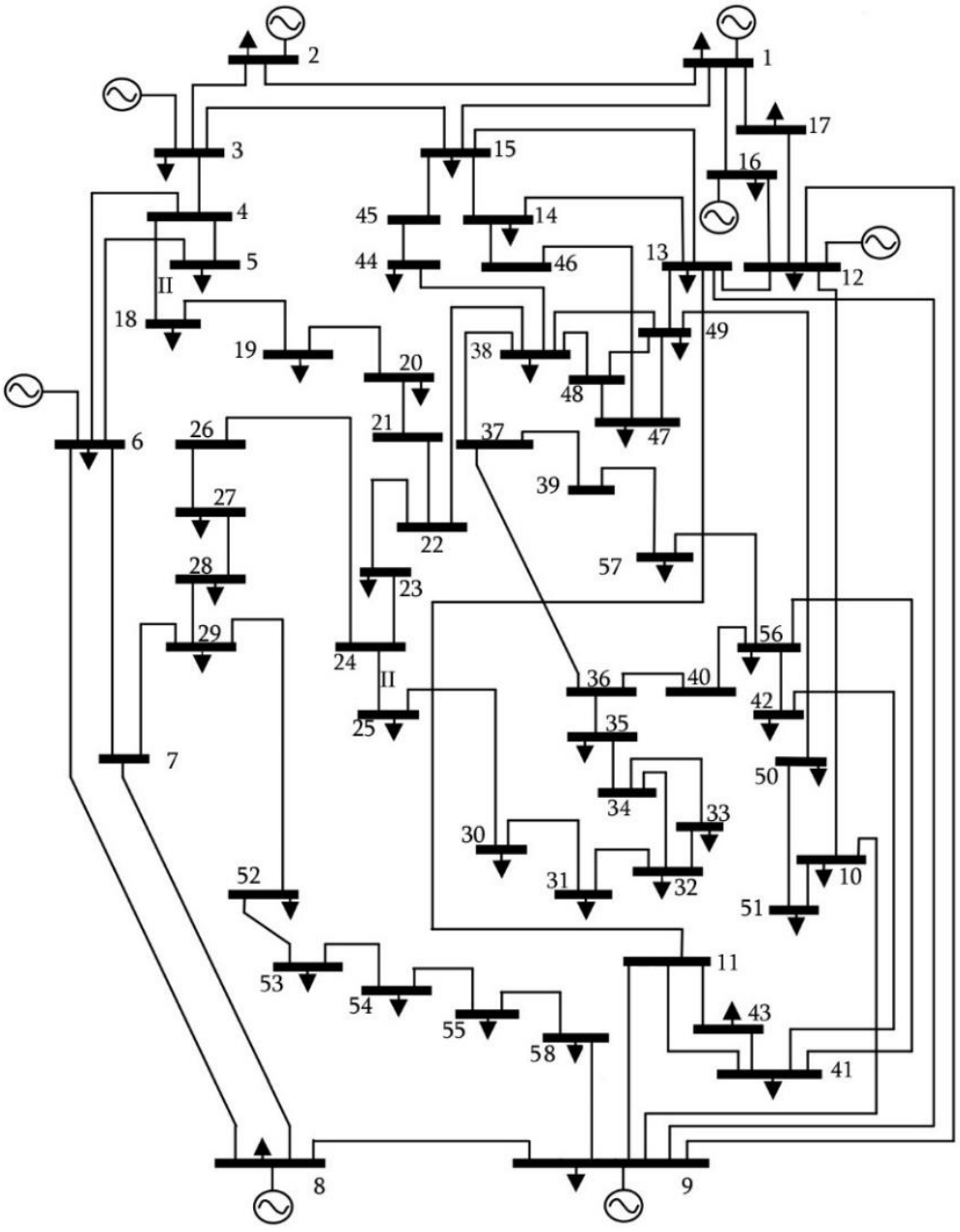

Рисунок 3.8 – 58-я шинная система распределения энергии.

Решатель успешно сходился за 3,45 секунды.

Значение целевой функции равно 44736,94 $/час, что представляет собой общую стоимость генерации.

Шины – это узлы в энергосистеме, куда подается электроэнергия. В нашем случае их количество равно 58.

Генераторы – это блоки, обеспечивающие систему электроэнергией. В нашем кейсе имеется 8 генераторов, единица измерения – МВт.

В рассматриваемой модели используются четыре типа шин, определяемые в рамках выбранной постановки задачи потокораспределения:

PQ bus = 1 – шина нагрузки. Шина нагрузки — это шина, на которой заданы активная мощность P и реактивная мощность Q. Другими словами, это шина с известной нагрузкой. Напряжение и фазовый угол в таких узлах неизвестны и определяются в результате расчета потокораспределения мощности. Шины типа PQ являются наиболее распространенным типом узлов в энергосистеме.

PV bus = 2 – шина генератора, на которой заданы активная мощность P и величина напряжения V. Данный тип шин обычно представляет генераторы в энергосистеме. Реактивная мощность Q и фазовый угол напряжения на таких шинах неизвестны и определяются в ходе расчета потокораспределения мощности. Величина напряжения на фотоэлектрической шине поддерживается за счет регулирования возбуждения генератора.

Reference bus = 3 – опорная шина. Опорная шина, также называемая *slack bus*, – это шина, для которой задаются и фиксируются как величина напряжения, так и фазовый угол. При анализе энергосистемы в качестве опорной обычно выбирается одна из шин, как правило – с основным генератором. Опорная шина обеспечивает баланс активной и реактивной мощности в системе, компенсируя системные потери и поддерживая общий баланс мощности. Мощность на slack bus априори неизвестна и определяется в процессе расчета потокораспределения мощности.

Isolated bus = 4 – изолированная шина. Изолированная шина — это шина, не подключенная к остальной части энергосистемы. Шины данного типа не участвуют в анализе потокораспределения мощности, поскольку отсутствуют линии электропередачи или трансформаторы, соединяющие их с другими шинами. Такие шины могут соответствовать неработающим участкам системы либо узлам, к которым не подключены генерация или нагрузка.

Общая фактическая выработка данного кейса составляет 1340,9 МВт при выходной реактивной мощности Q 291,5 МВАр, тогда как суммарная нагрузка в системе достигает 1325,2 МВт и 360,8 МВАр. Соответствующее распределение потоков мощности представлено на рисунке 3.9.

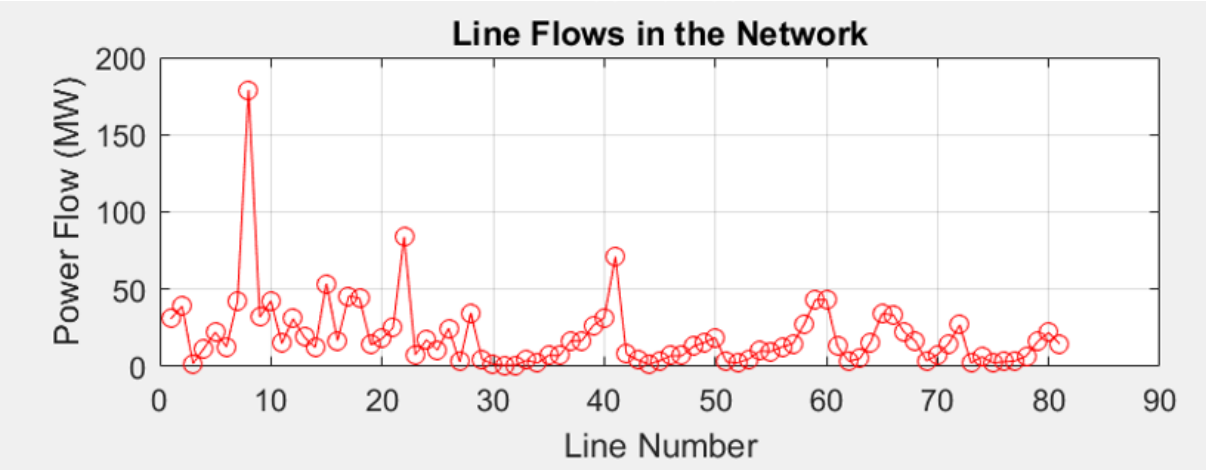

Рисунок 3.9 – Распределение потоков мощности в электрической сети

Суммарные потери активной мощности в ответвлениях составляют 15,67 МВт, а реактивной мощности – 69,10 МВАр (рисунок 3.10).

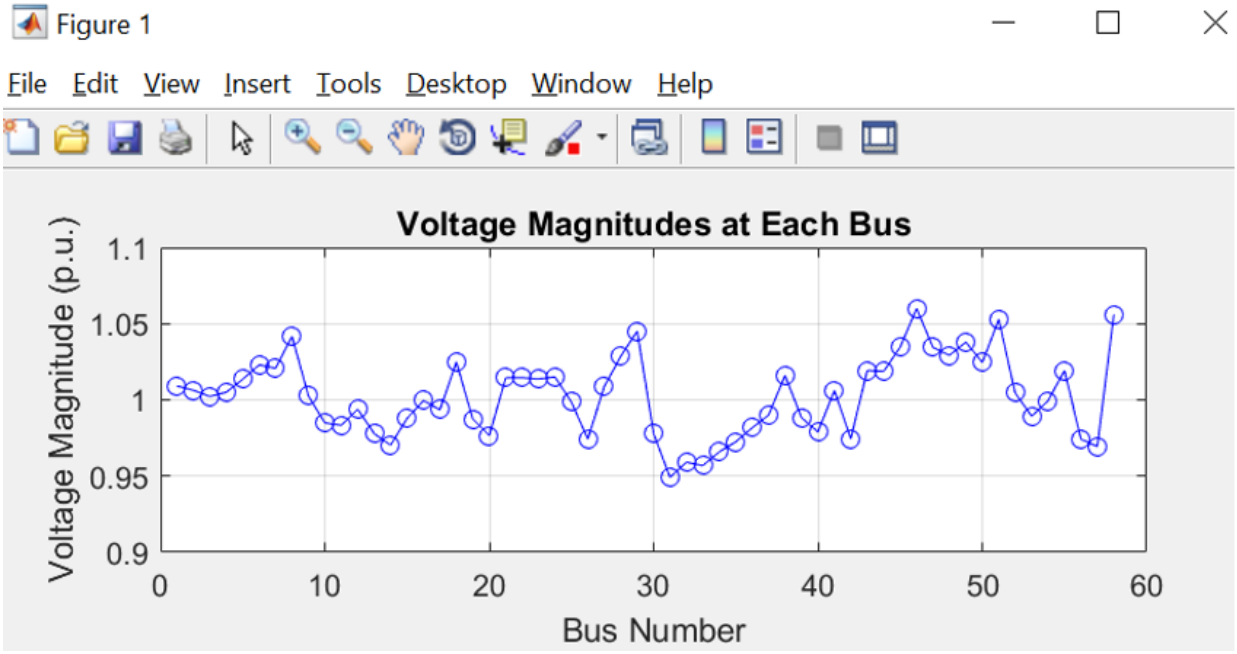

Рисунок 3.10 – Потери активной и реактивной мощности в ответвлениях электрической сети

Величина напряжения варьируется в диапазоне от 0,949 p.u. (на единицу) на шине 31 до 1,060 p.u. на шине 46. Это укладывается в допустимые рабочие пределы безопасной эксплуатации.

Фазовые углы напряжения при этом варьируются заметнее от 12,47 градуса на шине 31 до 4,15 градуса на шине 8.

Между шинами 8 и 9 фиксируются самые большие потери на линии, 3,17 МВт активной мощности и 16,19 МВАр реактивной (см. рисунок 3.11).

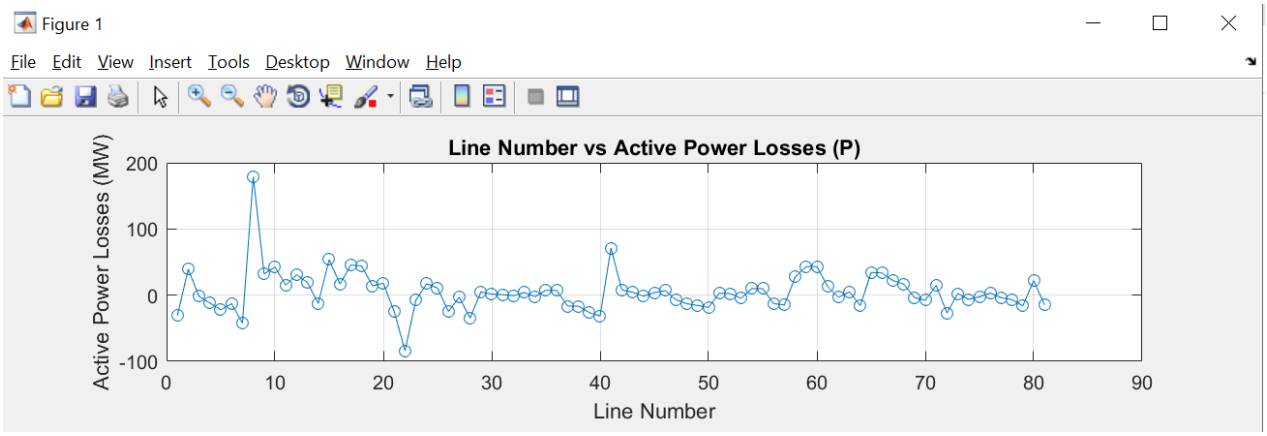

Рисунок 3.11 – Параметры установившегося режима электрической сети

Для каждой шины система фиксирует величину и угол напряжения, генерацию, если она есть, нагрузку и стоимость электроэнергии (λ). Так, шина 1 показывает величину напряжения 1,009 p.u., генерации на ней нет, нагрузка составляет 55 МВт и 17 МВАр, а λр равняется 41,731 $/МВА·ч (рисунок 3.12).

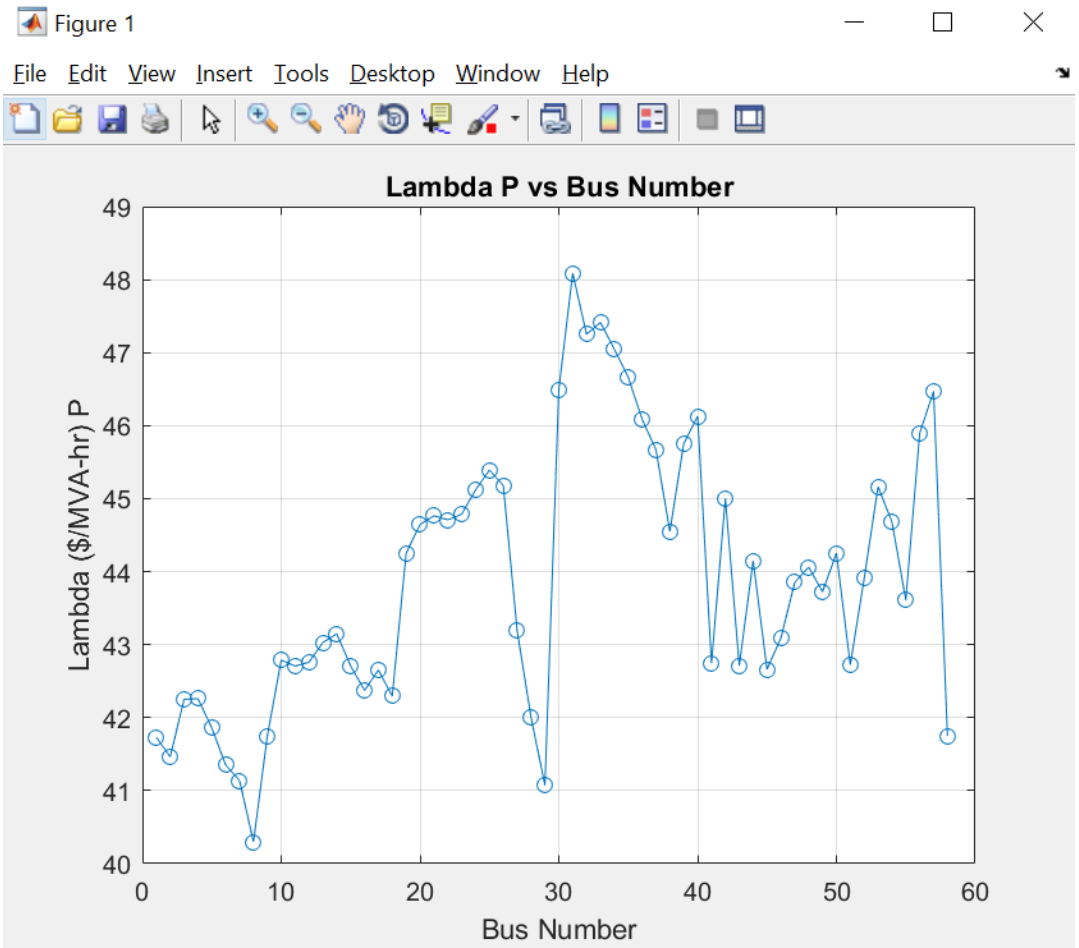

Рисунок 3.12 – Параметры узлов энергосистемы

По этим данным видно, что энергосистема работает эффективно, а уровень потерь остается управляемым. Напряжение держится в допустимых пределах, и выработка электроэнергии полностью покрывает потребности нагрузки. Значение целевой функции показывает суммарные затраты на генерацию в оптимизированном режиме и служит ключевым показателем экономической эффективности системы. А там, где видны ограничения по напряжению и генерации, можно судить об участках, работающих на пределе возможностей. Это важно учитывать при оценке надежности и планировании режимов работы.

3.2.2 Графовая модель Smart Grid системы и алгоритм Дейкстры

Сеть представляют в виде взвешенного ориентированного графа G=(V,E). Вершины здесь соответствуют узлам сети, а ребра соответствуют линиям передачи, вес которых определяют по оцененным потерям активной мощности или по значениям импеданса, полученным из расчета потоков мощности.

Чтобы каждый потребитель получал энергию от генератора с минимальными суммарными потерями передачи, применяют алгоритм кратчайшего пути Дейкстры.

Основная цель структуры маршрутизации, которая предлагается, состоит в оптимизации передачи энергии за счет минимизации потерь в линиях. Но и практические ограничения энергосистемы не остаются в стороне, перегрузка линий, термодинамические ограничения и устойчивость напряжения учитываются уже на этапе базовой модели расчета потокораспределения мощности.

Веса графа для маршрутизации получают на основе расчетов потокораспределения переменного тока (AC power flow), а эти расчеты автоматически учитывают тепловые пределы линий, уровни напряжения и ограничения допустимости режимов сети. Если ребро нарушает эксплуатационные ограничения, например превышает тепловые лимиты или выходит за допустимые уровни напряжения, оно исключается из множества допустимых решений еще до вычисления маршрута.

Получается, что алгоритм Дейкстры работает только с допустимыми состояниями сети, а значит, найденные маршруты одновременно соответствуют и критериям электрической реализуемости, и требованиям минимизации потерь мощности. Отдельный вопрос возникает, когда несколько маршрутов оказываются равнозначными по стоимости из-за структурной симметрии сети. В таком случае применяется детерминированная процедура разрешения неоднозначностей: она гарантирует, что решения будут однозначными и согласованными, а требования к надежности системы и оптимальности маршрутизации при этом не пострадают.

Пусть G=(V, E) обозначает взвешенный ориентированный граф, представляющий интеллектуальную энергосистему, где каждое ребро ei∈E имеет вес Wei, равный потерям активной мощности между узлами i и j. Тогда

для любого узла-генератора g∈V и узла-потребителя nc∈V кратчайший путь P*, найденный алгоритмом от ng к nc, обеспечивает минимальные суммарные потери мощности среди всех допустимых маршрутов.

Обозначим через Pgc множество всех путей от узла-генератора g к узлу-потребителю nc. Тогда для любого пути P∈Pgc совокупные потери мощности определяются следующим образом:

$$Lp = \sum_{e_{ij} \in P} w(e_{ij}) \tag{3.68}$$

Алгоритм гарантированно возвращает путь : $P^* \in P_{gc}$, для которого выполняется условие:

$$L(P^*) = \min_{P \in P_{gc}} \left(\sum_{e_{ij} \in P} w(e_{ij}) \right) \tag{3.69}$$

Следовательно, путь P*, найденный алгоритмом, обеспечивает минимальные совокупные потери мощности.

Рассмотрим сеть, заданную в виде взвешенного ориентированного графа G=(V,E), в котором каждое ребро (u,v)∈E обладает неотрицательным весом w(u,v), отражающим потери при передаче мощности. Путь $P=(v_0,v_1,\ldots,v_k)$ от узла-генератора $g=v_0$ к узлу-потребителю $c=v_k$ будем называть допустимым, если выполнены следующие условия:

1. путь является простым, то есть не содержит повторяющихся узлов;
2. каждое ребро (v_i,v_{i+1}) удовлетворяет эксплуатационным ограничениям, например ограничениям по нагреву линии и уровню напряжения;
3. все ребра обладают конечными весами $w(v_i,v_{i+1}) < \infty$.

Обозначим через $F_g \to c$ множество всех допустимых путей из g в c.

Докажем единственность такого пути. Предположим, что существуют два различных допустимых пути $P_1,P_2 \in F_g \to c$, обеспечивающих одинаковые минимальные потери:

$$L(P_1)=L(P_2)=L_{min} \tag{3.70}$$

Если значения потерь w(u,v) выбираются из непрерывной области, либо корректируются посредством детерминированного механизма разрешения неоднозначностей, например лексикографического порядка или выбора пути с минимальным числом переходов, то вероятность точного совпадения оказывается нулевой, либо возникающая неоднозначность устраняется детерминированно. Отсюда следует, что существует ровно один допустимый путь P⋆ с минимальными совокупными потерями.

Следует отметить, что в реальных энергосистемах при симметричной топологии или однородной нагрузке несколько линий передачи могут иметь близкие значения суммарных потерь. В связи с этим предлагаемый подход не предполагает обязательного требования строгой математической уникальности наилучшего маршрута: система маршрутизации опирается на детерминированный механизм разрешения неоднозначностей,

обеспечивающий согласованность и воспроизводимость выбора маршрутов. Если несколько альтернативных маршрутов обеспечивают одинаковые минимальные потери, алгоритм устраняет неоднозначность с помощью заранее определенного критерия упорядочивания (например, лексикографического порядка узлов или минимального количества переходов). Это обеспечивает детерминированность процедуры выбора решения при сохранении его оптимальности.

Все маршруты с одинаковой стоимостью являются эквивалентными по значению целевой функции, поэтому любой из них является оптимальным с точки зрения передачи энергии. Уровень блокчейна хранит криптографический хэш выбранного маршрута для обеспечения неизменяемости данных и возможности аудита, тогда как альтернативные маршруты с одинаковой стоимостью не влияют на корректность или справедливость системы. Основным требованием является детерминированность выбора маршрута при фиксированных условиях системы, а не обязательная уникальность единственного оптимального пути в смысле структуры графа.

Алгоритм нашей программы предназначен для определения маршрута передачи энергии от генератора к потребителю с минимальными потерями мощности. На первом этапе формируется ориентированный граф на основе тестовой энергосистемы IEEE, состоящей из 58 шин. В данной модели вершины графа соответствуют шинам системы, а ребра представляют линии электропередачи. В качестве весов ребер используются значения реальных потерь мощности, полученные в результате моделирования в среде MatPower.

Для каждого потребителя алгоритм осуществляет поиск маршрутов от всех доступных генераторов и выбирает путь, характеризующийся минимальными суммарными потерями мощности. Генератор, обеспечивающий наименьший уровень потерь, рассматривается как наиболее предпочтительный источник энергии для данного потребителя. Далее определяется оптимальный маршрут передачи энергии, минимизирующий совокупные потери. Такой подход способствует повышению эффективности распределения энергии в энергосистеме.

Программа итеративно вычисляет кратчайший путь, обновляя промежуточные расстояния по формуле:

$$d(v) = min\,[\,d(v), d(u) + w(u,v)], \forall\, v \in adj(u) \quad (3.71)$$

где w (u, v) – вес ребра, основанный на потерях.

Критерий выбора генератора с минимальными затратами определяется следующим соотношением:

$$\mathrm{Cost_{ij}} = \Sigma_{\mathrm{u,v}} \in \mathrm{Path_{ij}} \mathrm{w(u,v)} \quad (3.72)$$

Оптимальный генератор определяется как:

$$min_\{G \in Available\}\, Cost_\{G, C\}, \forall\, C \in Consumers \quad (3.73)$$

Для обеспечения надежности, прозрачности и автоматического исполнения контрактов на поставку энергии процесс выбора интегрирован с разрешенным блокчейном. Смарт-контракты, реализованные на языке Solidity, взаимодействуют с внешним графовым модулем и фиксируют соответствие «генератор – потребитель» в неизменяемом реестре.

После определения маршрута и подтверждения контракта система MatPower выполняет пересчет потоков мощности с учетом нового распределения. Таким образом, объединяются классические расчеты потоков мощности переменного тока, теория графов и технологии блокчейна для обеспечения безопасного и децентрализованного управления.

В результате каждый потребитель подключается к наиболее эффективному источнику энергии в условиях динамически изменяющейся энергосистемы.

Валидация системы проведена на тестовой системе IEEE с 58 шинами с использованием уравнений потоков мощности переменного тока:

$$P_{bus(\Theta,V\square)} = \mathrm{Re}\{V \cdot I_{bus}*\}, Q_{bus(\Theta,V\square)} = \mathrm{Im}\{V \cdot I_{bus}*\} \quad (3.74)$$

Весовые коэффициенты ребер сети, вычисленные оракулом, должны удовлетворять условию допустимой погрешности:

$$\forall e \in E: \left| \widehat{w}_t(e) - wt(e) \right| \leq \epsilon \quad (3.75)$$

где $\widehat{w}_t(e)$ обозначает вес, предоставленный оракулом, $w_t(e)$ – истинный вес, основанный на потерях мощности в момент времени t, ε представляет максимально допустимое отклонение, а E – множество всех линий передачи энергии.

Оптимальный маршрут определяется следующим образом:

$$P_t^* = \arg\min_{P \in \rho} Y \sum_{e \in P} \widehat{w}_t(e) \quad (3.76)$$

где Pt∗ обозначает глобально оптимальный маршрут в момент времени t, $\sum_{e \in P} \widehat{w}_t(e)$ представляет совокупные потери мощности, а ρ обозначает множество всех допустимых маршрутов между генератором и потребителем.

Полученные в рамках графовой модели маршруты, нуждаются в дополнительном механизме фиксации и проверки корректности при их применении в распределенной энергетической системе. Для решения этой задачи в работе применяется блокчейн верификация, которая обеспечивает неизменяемость и прозрачность выбранных решений маршрутизации.

3.3 Математическая модель блокчейн верификации маршрутов в задаче потокораспределения энергии

Предположим, что путь P*, определенный алгоритмом, записывается в смарт-контракт блокчейна с использованием хеш-проверки. В этом случае

транзакция передачи энергии сохраняет свойство минимизации потерь при условии, что веса графа $w(e_{ij})$ остаются неизменными.

Пусть хеш пути P* вычисляется при помощи криптографически стойкой хеш-функции H:

$$Hash(P*)=H(P*)=h* \quad (3.77)$$

Смарт-контракт сохраняет значение h* в блокчейне и на его основе проверяет входящие маршруты P′:

$$H(P')=h* \quad (3.78)$$

Если H(P′)=h*, то в силу свойства коллизионной стойкости хеш-функции H должно выполняться равенство P′=P*. Поскольку P* представляет собой единственный маршрут с минимальными потерями при фиксированных весах w(eij), каждая подтвержденная транзакция сохраняет оптимальную конфигурацию маршрутизации.

Смарт-контракт проверяет указанный хеш, сохраняет допустимый маршрут и автоматически применяет заданные правила расчетов. Возникающие события уведомляют участников сети, что обеспечивает отслеживаемость операций без дополнительных затрат на хранение данных.

На уровне архитектурной реализации предложенный механизм криптографической верификации маршрута функционирует в составе распределенной системы управления энергетическими потоками. Чтобы обеспечить масштабируемость системы, вычислительно сложные процедуры расчета потокораспределения и обновления параметров сети выполняются вне блокчейна, тогда как смарт-контракт отвечает за проверку корректности полученных результатов и их неизменяемую фиксацию. Далее рассматривается архитектура взаимодействия off-chain и on-chain компонентов, обеспечивающая реализацию предложенной модели в условиях реальной энергосистемы.

Смарт-контракт обеспечивает выбор маршрута с минимальными потерями среди всех рассматриваемых узлов при условии, что внешний off-chain оракул потокораспределения мощности предоставляет своевременные и достоверные обновления состояния энергосистемы. Данная гипотеза предполагает, что блокчейн архитектура способна поддерживать операционную целостность системы при изменяющихся нагрузках, нестабильной генерации возобновляемых источников энергии и изменениях топологии сети, поскольку каждое решение маршрутизации опирается на аутентифицированные данные о состоянии системы в реальном времени.

Компоненты on-chain и off-chain разделены достаточно четко. Расчеты потокораспределения переменного тока (AC power flow) и обновление весов графа выполняются вне блокчейна ради снижения вычислительных затрат, тогда как в самом блокчейне хранится только идентификатор маршрута, объем

передаваемой энергии, экономическая стоимость и проверочный хеш, что и обеспечивает прозрачность системы. Аутентифицированные обновления потокораспределения, поступающие от защищенных off-chain оракулов, снижают влияние устаревших или искаженных данных на процесс расчетов. Благодаря этому записи в блокчейне остаются достоверными без дополнительных затрат газа на выполнение вычислительно сложных операций внутри сети.

Неизменяемость блокчейна в сочетании с детерминированным выполнением смарт-контрактов заметно повышает безопасность системы. Поскольку все подтвержденные решения маршрутизации и результаты расчетов сохраняются в блокчейне, несанкционированно изменить параметры потоков энергии или стоимость передачи становится существенно сложнее как для пользователей, так и для операторов. Дополнительную защиту дает ограниченный набор валидаторов, снижающий риск Sybil-атак, а временные метки транзакций вместе с хешами маршрутов защищают от атак повторного воспроизведения и подмены данных. Традиционные централизованные системы управления, как правило, не обеспечивают сопоставимого уровня целостности и аудируемости данных.

Выводы по главе 3

В третьей главе разработаны математические модели и предложены методы расчета входящего потока и маршрутизации в интеллектуальной системе с использованием графового представления сети и механизмов блокчейн верификации. Выявлено, что сочетание классических моделей установившегося режима системы с графовыми алгоритмами позволяет формализовать задачу выбора генератора как задачу оптимизации на взвешенном ориентированном графе.

Показано, что применение моделей установившегося режима, реализованных в среде MatLab с применением специализированного пакета MatPower, обеспечивает получение устойчивых и физически интерпретируемых оценок потоков мощности, уровней напряжения и потерь в сети. Использование численных методов решения нелинейных уравнений потокораспределения позволяет сформировать исходные данные для последующего графового анализа и построения маршрутов передачи энергии.

Обосновано представление электроэнергетической системы в виде взвешенного графа, где вершины соответствуют узлам сети, а ребра – линиям электропередачи с весами, определяемыми потерями активной мощности. Это, в свою очередь, обеспечивает возможность применения алгоритма Дейкстры для определения маршрутов передачи энергии с минимальными потерями.

Проведенный анализ подтвердил, что интеграция графового подхода с результатами расчета потокораспределения позволяет учитывать реальные эксплуатационные ограничения энергосистемы, в том числе по напряжению, нагрузке и пропускной способности линий. Благодаря этому при формировании

маршрутов используются только допустимые состояния сети, что повышает физическую корректность получаемых решений.

Не менее важный результат касается криптографической фиксации маршрутов в блокчейне. Она обеспечивает неизменяемость и проверяемость результатов маршрутизации. За счет хеш-функций и смарт-контрактов гарантируется соответствие между вычисленным оптимальным маршрутом и его последующей верификацией в распределенной среде.

Отдельно стоит отметить эффект от разделения вычислений на on-chain и off-chain компоненты. Такой подход позволяет совместить вычислительную эффективность моделей потокораспределения с преимуществами блокчейн инфраструктуры. Расчеты установившихся режимов и обновление весов графа выполняются вне блокчейна, тогда как в самом блокчейне фиксируются результаты маршрутизации и параметры транзакций.

Обосновано, что использование разрешенной блокчейн сети с механизмом Proof-of-Authority обеспечивает предсказуемое время подтверждения транзакций и делает возможным применение предложенного подхода в задачах управления энергосистемой в режиме близком к реальному времени.

Таким образом, результаты третьей главы формируют математическую и алгоритмическую основу предложенного подхода к маршрутизации энергии в интеллектуальной энергосистеме. Разработанные модели и методы объединяют теорию телетрафика, теорию графов и блокчейн верификацию, обеспечивая основу для реализации программной системы и последующей экспериментальной оценки ее эффективности.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ОЦЕНКА И ОБСУЖДЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРЕДЛОЖЕННОЙ МОДЕЛИ

4.1 Экспериментальная среда и методика оценки

Среда Ethereum, использованная в данной работе, была развернута посредством локальной сети Proof-of-Authority на базе Ganache/Geth. Она демонстрирует функционирование смарт-контрактов и подтверждает функциональную корректность предлагаемой системы маршрутизации и расчетов на основе блокчейна.

Следует пояснить, что блокчейн эксперименты, проведенные в данном исследовании, выполнялись в локальной PoA-среде. Такая конфигурация была специально выбрана для проверки функциональной корректности, логики смарт-контрактов и общего процесса функционирования предлагаемой архитектуры в контролируемой среде. Локальная среда дает быстрое тестирование и воспроизводимость результатов, но у нее есть существенное ограничение, как не способность полностью воспроизвести поведение реальных блокчейн сетей. За кадром остаются задержки взаимодействия валидаторов, сетевые задержки распространения блоков, различия в

производительности аппаратного обеспечения узлов, а также отсутствуют географически распределенные узлы-валидаторы и конкуренция за вычислительные ресурсы.

Именно поэтому такая конфигурация подходит скорее для тестирования логики системы, проверки функционирования и отладки смарт-контрактов, чем для реалистичного бенчмаркинга производительности. Соответственно, представленные результаты по задержкам и потреблению газа стоит воспринимать как оптимистичные нижние оценки и показатели работоспособности системы, а не как точные и окончательные показатели задержек или пропускной способности реальной блокчейн сети. В масштабных или географически распределенных развертываниях следует ожидать дополнительных задержек и накладных расходов, связанных с сетевой синхронизацией и процессами консенсуса.

Для сравнительного анализа была реализована базовая централизованная система. В нее вошли модуль маршрутизации на Python, база данных PostgreSQL для хранения маршрутов и расчетных данных, а также REST API для отправки и получения решений. Чтобы сравнение оставалось корректным, все вычислительные процедуры, включая анализ потокораспределения мощности, вычисление кратчайших маршрутов и операции расчетов, выполнялись на одном и том же оборудовании. Сама базовая система оптимизирована под модель с единственным доверенным центром управления, тогда как блокчейн неизбежно добавляет накладные расходы, связанные с децентрализацией, неизменяемостью и возможностью аудита.

Ganache CLI настроили с пятьюдесятью восемью предварительно финансируемыми аккаунтами для развертывания и взаимодействия со смарт-контрактами. За компиляцию и миграцию контрактов отвечал Truffle, а MetaMask и Remix IDE использовались для работы со смарт-контрактами и отслеживания транзакций. Подключение модуля моделирования к блокчейн инфраструктуре обеспечивала библиотека Web3.js, что позволило провести сквозное тестирование пользовательских запросов.

Искусственно сформированный запрос потребителя запускал конвейер выполнения смарт-контрактов: тот оценивал АС потокораспределение, вычислял потери мощности и определял оптимальный генератор с помощью алгоритма Дейкстры. Контракт фиксировал пару «генератор–потребитель», объем энергии и условия расчетов в локальном блокчейне, причем с быстрым подтверждением транзакций и возможностью измерить потребление газа. Моделирование подтвердило, что предлагаемая архитектура работает устойчиво и прозрачно даже при перегрузках сети и одновременных запросах. Хотя испытательный стенд подтверждает корректность системы, архитектурную реализуемость и устойчивую децентрализованную координацию смарт-контрактов, воспроизвести поведение распределенной блокчейн сети в масштабных условиях он не способен.

4.2 Результаты экспериментальной оценки

4.2.1 Энергетическая эффективность маршрутизации

Чтобы обеспечить справедливость и методологическую согласованность сравнения, базовая система использовала тот же алгоритм маршрутизации, ту же модель расчета потерь и тот же вычислительный процесс, что и блокчейн реализация. Обе системы опирались на идентичные результаты АС потокораспределения, одинаковые веса графа и один и тот же алгоритм Дейкстры для выбора маршрута с минимальными потерями. Единственное различие между реализациями заключалось в уровне исполнения: базовая система хранила результаты маршрутизации и расчетов в централизованной базе данных PostgreSQL, тогда как блокчейн реализация записывала подтверждения в разрешенную Ethereum-сеть с механизмом PoA. Такая постановка эксперимента позволяет изолированно оценить влияние децентрализации и накладных расходов консенсуса, не затрагивая при этом вычислительную логику или алгоритмы оптимизации.

Чтобы оценить производительность предлагаемого подхода, использовались следующие метрики:

- потери активной мощности в линиях электропередачи;
- маршрут передачи энергии и совокупные потери;
- затраты газа на выполнение операций;
- время развертывания и исполнения смарт-контрактов;
- относительная производительность блокчейн реализации по сравнению с базовой системой;
- снижение углеродных выбросов.

4.2.2 Производительность блокчейн инфраструктуры

Потери активной мощности в линиях электропередачи

На рисунке 4.1 показаны потери активной мощности в линиях электропередачи до и после оптимизации. Для каждой линии выведены два столбца: более высокий оранжевый столбец отражает потери до оптимизации, а более низкий красно-оранжевый показывает результат после нее. По всем линиям видно заметное снижение потерь, причем для линий 2, 5 и 8 они упали с 18–20 кВт до 13 кВт и ниже.

Такого результата удалось достичь за счет оптимизационного метода, который сочетает графовую маршрутизацию с итеративными расчетами потокораспределения мощности. График наглядно показывает рост эффективности передачи энергии, а именно это и определяет устойчивую, экономически эффективную работу интеллектуальных энергосетей.

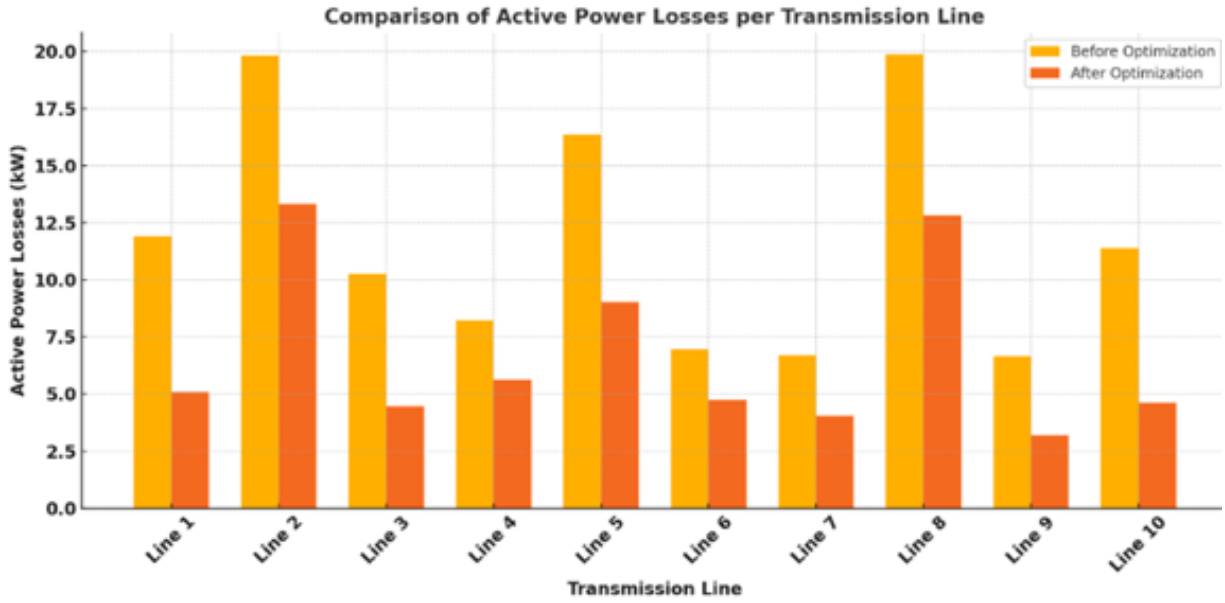

Рисунок 4.1 – Потери активной мощности в 10 линиях электропередачи до и после оптимизации [80]

Маршрут передачи энергии и совокупные потери

На рисунке 4.2 сравниваются совокупные потери мощности для двух маршрутов передачи энергии:

G1→B1→B2→C1 и

G1→B3→C1.

Маршрут G1→B3→C1 показывает меньшие потери мощности (4,2 единицы) по сравнению с альтернативным (4,5 единицы). Разница небольшая, но она наглядно показывает, как алгоритм кратчайшего пути Дейкстры выбирает маршрут передачи энергии с минимальными потерями в рамках предлагаемой системы.

Такая оптимизация помогает сохранять энергию и повышает эффективность инфраструктуры энергосети в целом. При этом предлагаемый подход не просто снижает потери, он делает решения о маршрутизации более обоснованными за счет данных и одновременно поддерживает децентрализованное управление энергией.

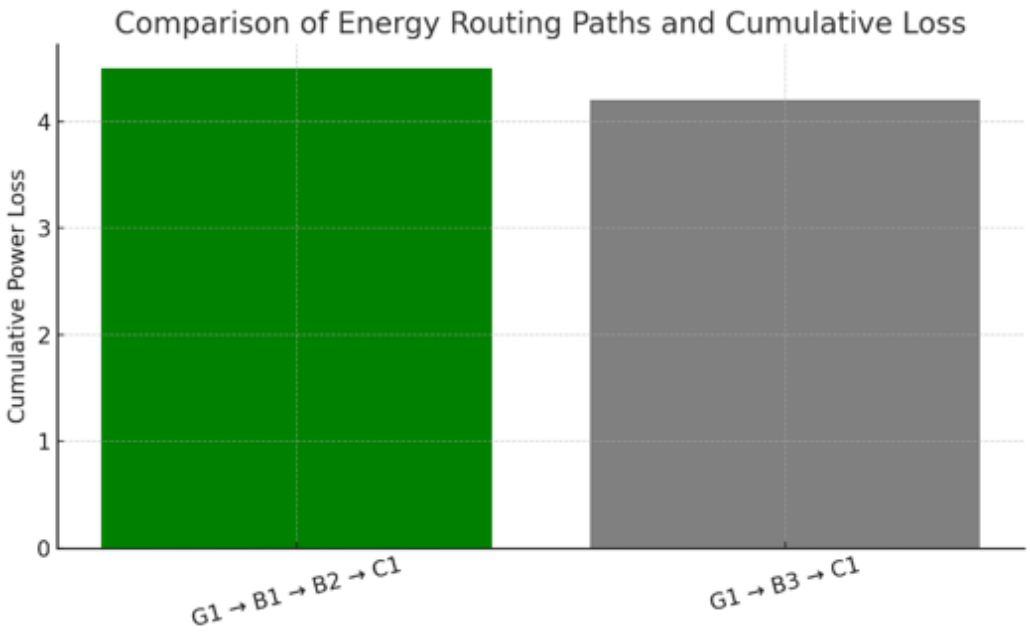

Рисунок 4.2 – Анализ совокупных потерь мощности для двух маршрутов передачи энергии [80]

Затраты газа на выполнение операций

На рисунке 4.3 предлагаемый подход сравнивается с базовой системой по потреблению газа. Сравнение идет по трем показателям: средний объем газа на развертывание смарт-контракта, объем газа на выполнение транзакции и общее количество газа за полный цикл транзакции.

По всем трем категориям предлагаемый подход оказывается экономичнее. На развертывание контракта базовая система тратит 150 000 единиц газа, тогда как рассматриваемая архитектура укладывается в 120 000. При выполнении транзакций разрыв еще заметнее, 50 000 единиц против 70 000 у базовой архитектуры. А если брать полный цикл целиком, включая развертывание, выполнение и завершение операции, предлагаемое решение расходует 170 000 единиц газа против 220 000 у базовой системы.

Такая экономия делает подход более практичным именно там, где он и нужен, при частых энергетических транзакциях в реальном времени на основе блокчейн интеллектуальных сетях. Заодно меньший расход газа снижает углеродные выбросы и повышает масштабируемость системы при высоких нагрузках.

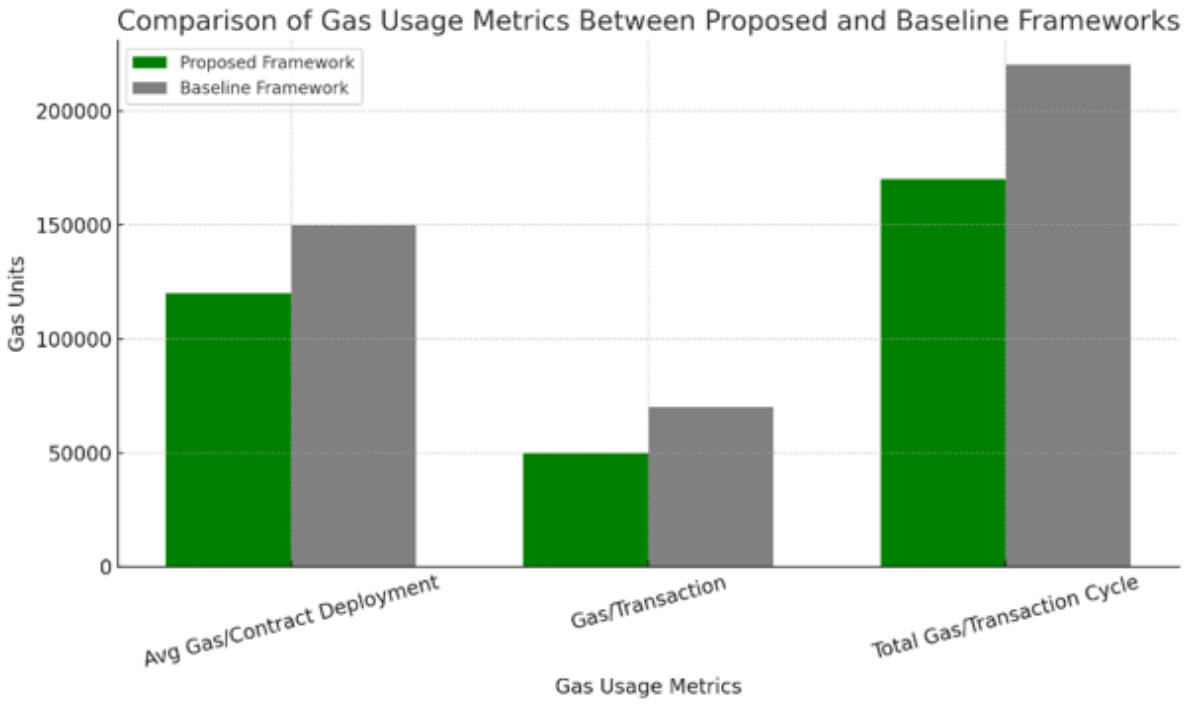

Рисунок 4.3 – Сравнение базовой архитектуры и предлагаемой системы по потреблению газа на основе трех ключевых показателей [80]

Развертывание и выполнение смарт-контрактов

На рисунке 4.4 показаны средние и максимальные значения времени развертывания и выполнения смарт-контрактов в миллисекундах.

В среднем развертывание контракта занимает 320 мс, а в пике может доходить до 450 мс. Выполнение контрактов проходит быстрее, в среднем 210 мс, максимум 300 мс. Это важная характеристика именно для интеллектуальных сетей реального времени, где распределение энергетических ресурсов должно быть динамичным и эффективным.

То, что все задержки укладываются в менее чем одну секунду, показывает, что система на основе блокчейна способна оперативно реагировать на энергетические запросы, не создавая заметных временных задержек.

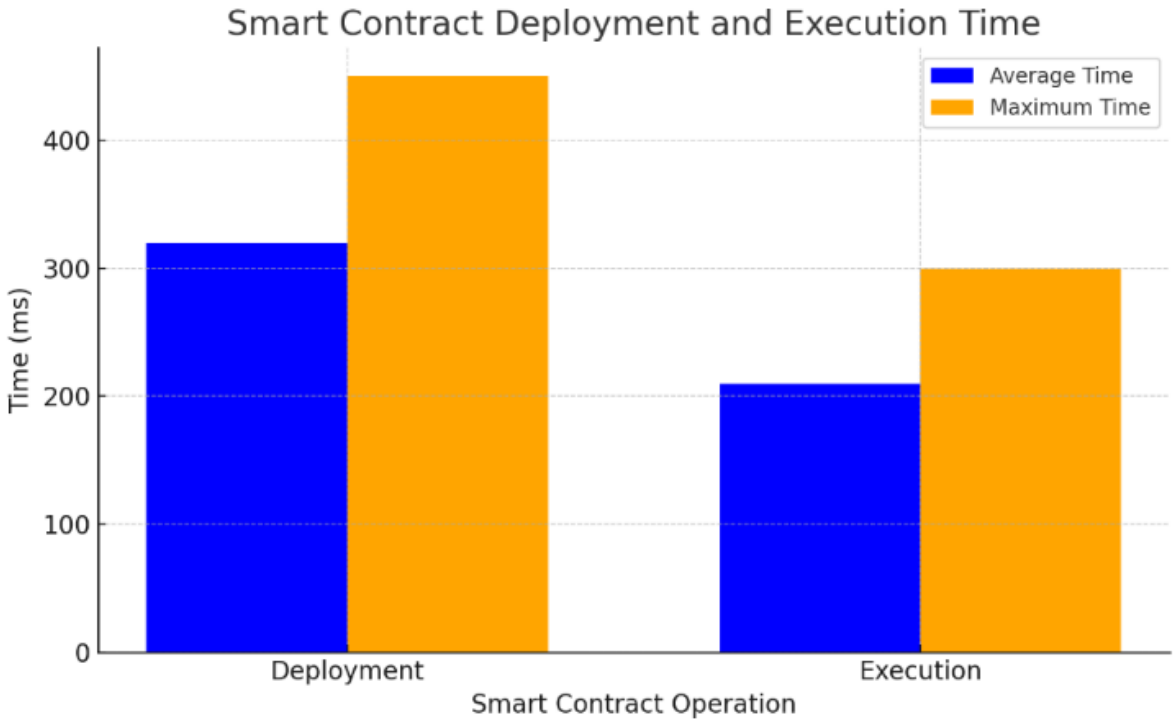

Рисунок 4.4 – Время развертывания и выполнения смарт-контрактов [80]

Эти временные показатели также говорят об эффективности блокчейн архитектуры в локальной тестовой среде Ethereum на базе Ganache и Truffle, хотя сама эта среда остается контролируемой и упрощенной. Низкие задержки указывают на потенциальную масштабируемость и устойчивость системы при высокой частоте транзакций, например в интеллектуальных энергосетях, где множество узлов одновременно инициируют запросы и получают распределение энергии.

Сравнение производительности: предлагаемая система и базовая система смарт-контрактов

На рисунке 4.5 видно, что система смарт-контрактов на основе блокчейна превосходит базовую архитектуру по всем рассматриваемым показателям производительности, что говорит о ее технологических и эксплуатационных преимуществах. Задержка транзакций снижается со 150–270 мс до 130–230 мс, что дает среднее улучшение на 22%. Такое сокращение задержек говорит о том, что предлагаемая система лучше справляется с обработкой параллельных запросов и обеспечивает более быстрое взаимодействие даже при повышенной нагрузке.

Похожая картина и со временем выполнения тестовых измерений, которая у базовой системы составляет 40–65 мс, а у предлагаемого подхода 34–55 мс, что в среднем дает ускорение на 18%. Это ускоряет подтверждение транзакций и делает конвейеры выполнения смарт-контрактов более оптимизированными.

По пропускной способности разрыв заметнее всего, поскольку у базовой системы она варьируется от 300 до 1300 TPS, а у предлагаемой системы достигает от 400 до более чем 1900 TPS. Это уже прямое свидетельство высокой масштабируемости. При высоких нагрузках прирост производительности доходит до 30%, а значит, система способна обрабатывать больше транзакций, не теряя при этом в качестве обслуживания.

Наконец, по потреблению газа на транзакцию базовая архитектура тратит 44–50 kGas, а предлагаемый подход укладывается в 39–44 kGas, что дает сокращение затрат примерно на 12%. Меньший расход газа означает и меньшие расходы для пользователей и организаций, поскольку на каждую транзакцию уходит меньше ресурсов блокчейн сети.

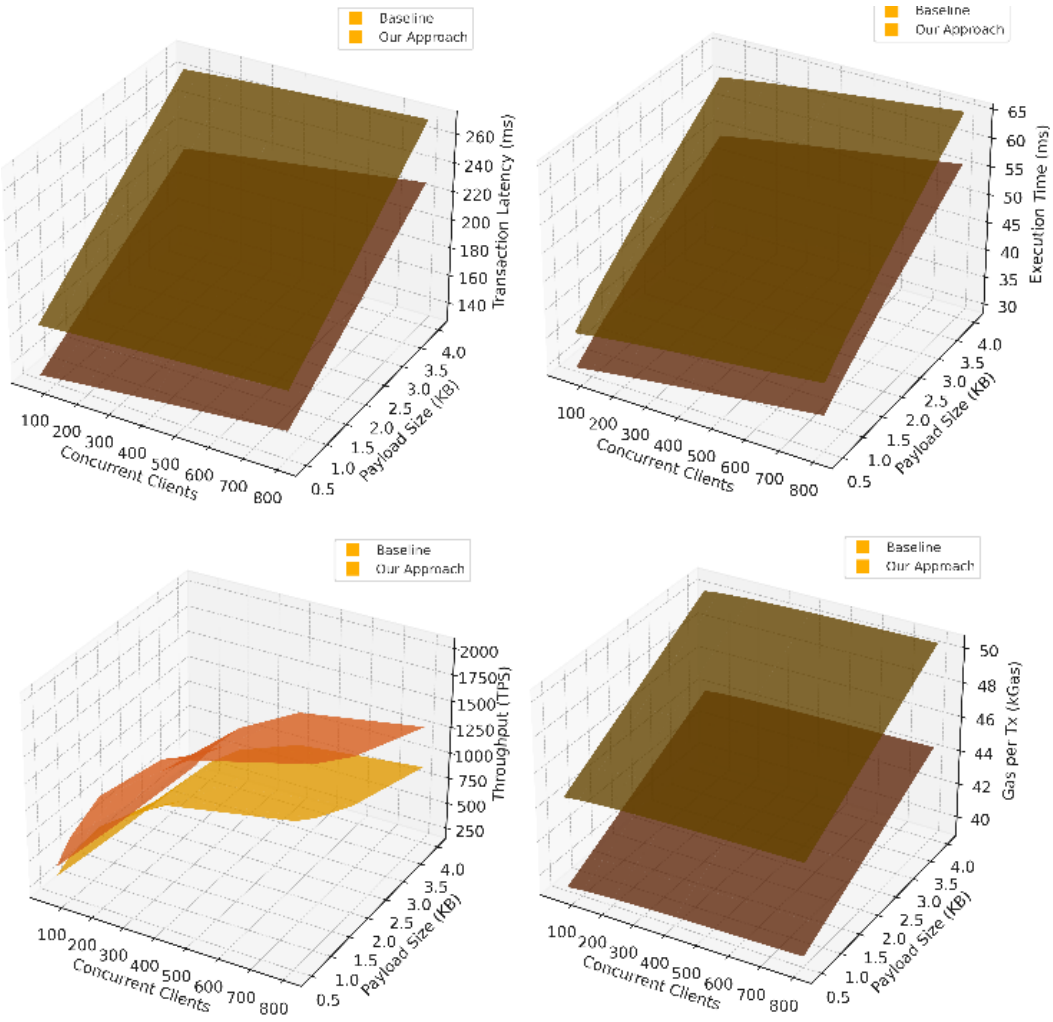

Рисунок 4.5 Сравнение предлагаемой системы смарт-контрактов на основе блокчейна с базовой архитектурой [80]

В сумме все эти результаты говорят об одном, что предлагаемый подход обрабатывает транзакции быстрее, работает с меньшими задержками, лучше масштабируется и экономичнее по газу. А значит, оказывается более удачной альтернативой базовой системе, особенно для крупномасштабных блокчейн развертываний.

4.2.3 Экологическая эффективность и статистическая валидация

Снижение выбросов углерода

Чтобы оценить выбросы углерода в Smart Grid системе, анализируют совокупные потери мощности, которые возникают в генерирующих установках и линиях электропередачи. Для каждого элемента системы эти энергетические потери переводят в эквивалентные выбросы CO_2, учитывая при этом коэффициент полезного действия генерирующего оборудования и удельную углеродную интенсивность используемого энергоресурса.

Расчет строится в три шага. Сначала определяются потери мощности для каждого генератора и участка электрической сети при заданном режиме работы энергосистемы. Затем эти значения корректируют с учетом эффективности соответствующего оборудования, так удается оценить, сколько первичной энергии реально требуется, чтобы компенсировать выявленные потери. И наконец, скорректированные значения умножают на коэффициенты углеродной эмиссии, которые отражают объем выбросов CO_2 на единицу произведенной электроэнергии. В результате получается количественная оценка вклада отдельных элементов энергосистемы в общий углеродный след, а значит, появляется возможность учитывать экологические последствия технологических потерь при анализе режимов работы системы.

Сами коэффициенты углеродной эмиссии зависят от типа энергоресурса и технологии производства электроэнергии. Для установок на природном газе они выше, поскольку сказывается использование углеродсодержащего ископаемого топлива. А вот у возобновляемых источников, включая солнечную и ветровую генерацию, коэффициенты заметно ниже, таких как прямых выбросов CO_2 в процессе выработки энергии здесь попросту нет.

Суммарные выбросы углерода по энергосистеме получают, агрегируя вклад всех генерирующих установок с учетом их потерь мощности и характеристик используемых энергоресурсов. Такой подход дает комплексную оценку экологических последствий технологических потерь в электрической сети, а заодно закладывает основу для сравнения разных стратегий, к примеру управления потоками мощности, маршрутизации энергии и оптимизации режимов работы энергосистемы по тому, насколько эффективно каждая из них снижает выбросы CO_2.

Рисунок 4.6 (1) описывает нормальные условия эксплуатации: здесь BSCS снижает выбросы на 20–55%, тогда как остальные подходы дотягивают лишь до 10–35%. Разрыв особенно заметен при средней и высокой доле возобновляемых источников энергии (R=0.6–1.0) и умеренной нагрузке (L≈0.6–0.9), то есть именно там, где уровень перегрузки сети минимален.

При высокой перегрузке сети картина меняется, и это видно на рисунке 4.6 (2). Производительность падает у всех подходов, но BSCS все же удерживает сокращение выбросов на уровне 15–40%, опережая остальные методы на 8–12%. Даже когда уровень перегрузки превышает 0.7,

преимущество BSCS сохраняется, поскольку сказывается эффективная маршрутизация и децентрализованные механизмы расчетов.

Другой сценарий, пиковая нагрузка, представлен на рисунке 4.6 (3). При максимальном спросе (L=1.2) BSCS дает сокращение выбросов на 18–42%, а другие методы останавливаются на 10–28%. Разница в производительности держится в диапазоне 10–15%, что подтверждает устойчивость системы даже под высокой нагрузкой.

Рисунок 4.6 (4) переносит нас в условия высокой доли возобновляемых источников энергии. Когда доля ВИЭ превышает 80% (R>0.8), BSCS обеспечивает снижение выбросов на 30–60%, тогда как альтернативные подходы достигают лишь 20–45%. Здесь система оптимизирует использование возобновляемой энергии за счет динамической корректировки маршрутов с минимальными потерями.

Обратная ситуация показана на рисунке 4.6 (5), где низкая доля возобновляемых источников. При R<0.3 общее сокращение выбросов заметно скромнее в принципе, но и здесь BSCS дает 12–28% против 8–20% у других методов. Это подтверждает, что подход остается эффективным даже в энергосистемах, где преобладает ископаемое топливо.

Наконец, рисунок 4.6 (6) показывает эффект от политических стимулов. При введении углеродного ценообразования или сигналов управления спросом BSCS достигает снижения выбросов на 35–65%, опережая конкурирующие подходы до 20%. Получается, что внешние стимулирующие механизмы усиливают эффективность графовой оптимизации BSCS сразу по двум направлениям: экологическому и экономическому.

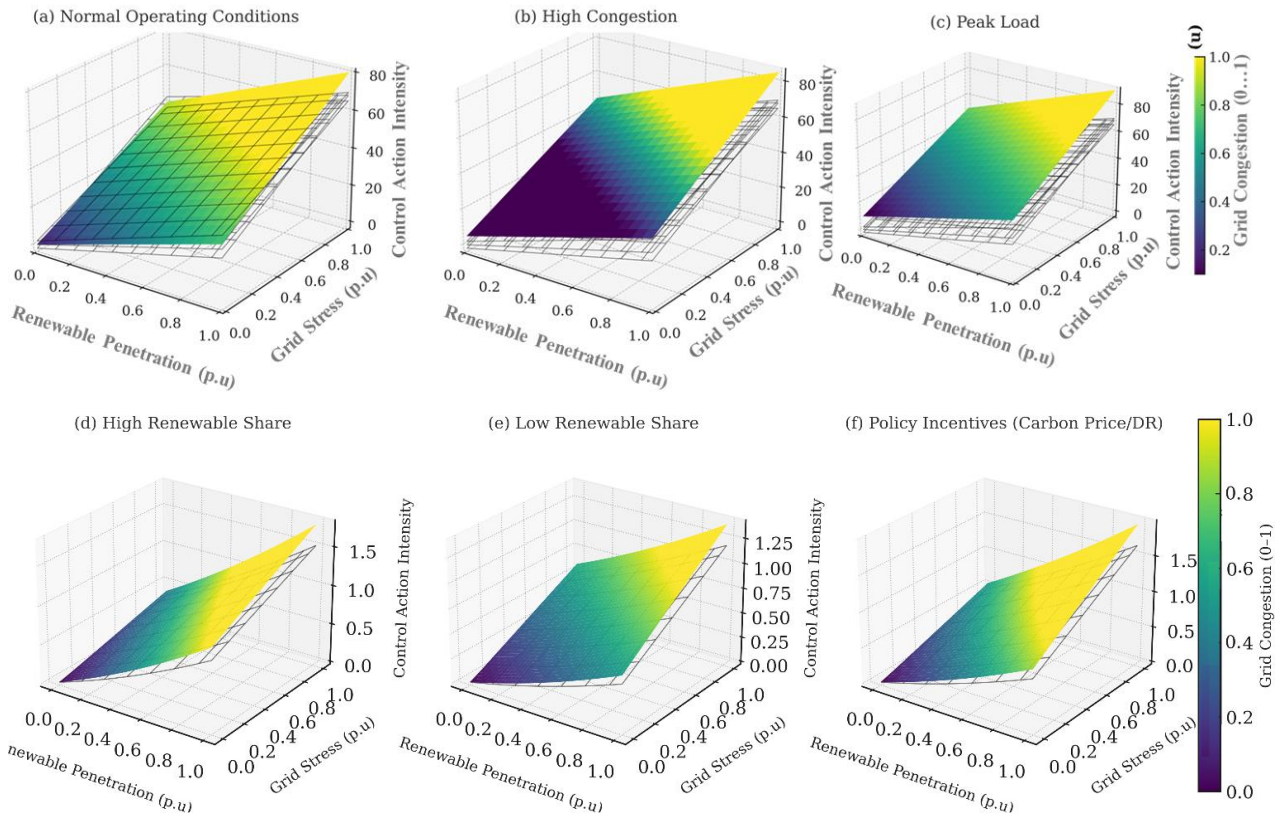

Рисунок 4.6 Сравнение сокращения выбросов углерода в шести сценариях работы: (1) Нормальные условия, (2) Высокая загруженность сети, (3) Пиковая нагрузка, (4) Высокая доля возобновляемых источников энергии, (5) Низкая доля возобновляемых источников энергии и (6) Политические стимулы. Подход BSCS (предложенный) показан цветной поверхностью, а известные методы представлены в виде каркасных моделей. Интенсивность цвета указывает на уровень загруженности сети [80]

Статистическая валидация результатов

Для обеспечения статистической достоверности и воспроизводимости полученных результатов каждый эксперимент выполнялся десять раз в идентичных условиях тестирования. При каждом запуске использовались случайно инициализированные параметры сети и начальные состояния смарт-контрактов, что позволило учесть влияние стохастических факторов на исследуемые показатели производительности.

На рисунке 4.7 представлены средние значения показателей вместе с 95-процентными доверительными интервалами (confidence intervals, CI). Стандартные отклонения были вычислены для метрик потерь активной мощности, потребления газа, задержек и пропускной способности, а во все обновленные статистические результаты были включены полосы ошибок (error bars), отражающие вариативность данных.

Статистическая значимость различий между предлагаемой и базовой системами оценивалась с использованием парного t-критерия Стьюдента для нормально распределенных данных и критерия знаковых рангов Уилкоксона

для непараметрических сравнений. Все улучшения по показателям задержки, пропускной способности и газовой эффективности были признаны статистически значимыми ($p<0.05$).

Проведенные эксперименты показывают: выявленные преимущества устойчиво воспроизводятся в разных сценариях моделирования, а значит, объясняются не случайными колебаниями параметров, а реальным эффектом предложенного подхода.

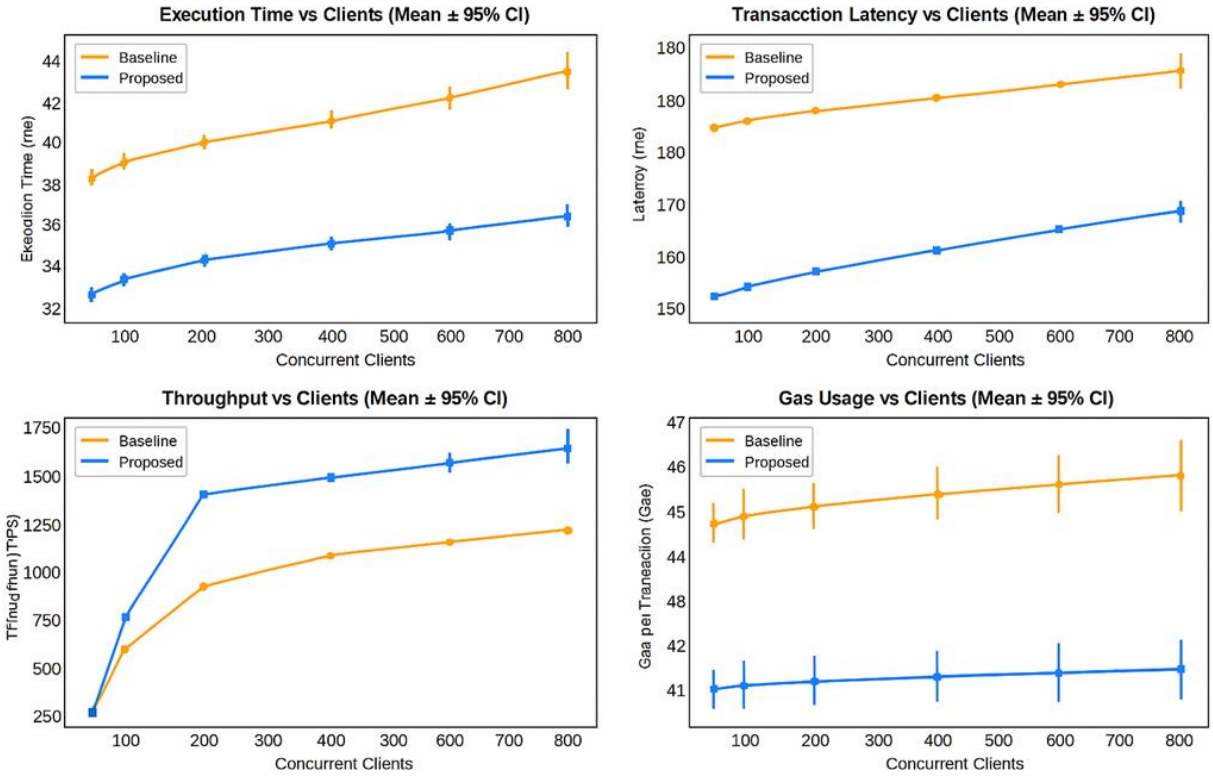

Рисунок 4.7 – Оценка производительности с использованием 95-процентных доверительных интервалов, демонстрирующая сравнение базовой и предлагаемой моделей

4.3 Архитектурная реализация и программная модель предложенной системы

Программа построена на результатах выполненных расчетов и предназначена для автоматизации распределения энергии, в том числе управления локальными источниками, солнечными панелями и ветряными турбинами. За счет этого сеть становится эффективнее, безопаснее и устойчивее. Помимо этого, программа интегрирует возобновляемые источники энергии в существующие системы, автоматизирует покупку и продажу энергии, а прозрачность транзакций обеспечивается за счет блокчейн технологий.

Благодаря программе можно управлять распределенной генерацией энергии, поддерживать стабильность энергетической сети и снижать

операционные затраты — за счет отказа от посредников и автоматизации процессов. Отдельное внимание при этом уделено безопасности данных и выполняемых операций: это особенно важно, когда управление децентрализовано, а энергетические ресурсы распределены.

В штатном режиме интеллектуальная система направляет поступающие запросы на передачу энергии сразу в графовый модуль, минуя методы теории телетрафика. На этом этапе сеть представляют в виде взвешенного графа, где вершины соответствуют генераторам, потребителям и промежуточным узлам сети, а ребра соответствуют линиям электропередачи, вес которых определяется величиной потерь активной мощности. Для каждого доступного генератора вычисляются суммарные потери на пути до выбранного потребителя, и на основе этого расчета выбирается генератор с маршрутом передачи энергии, дающим минимальные потери.

Если загрузка системы превышает установленный порог, включается аварийный режим, и тогда дополнительно подключается модуль теории телетрафика. Систему управления заявками в этой работе моделируют как многоканальную систему массового обслуживания с двумя классами приоритетов. Высокоприоритетные заявки, относящиеся к стратегически важным объектам энергосистемы, обслуживаются в первую очередь, а низкоприоритетные запросы либо встают в очередь ожидания, либо отклоняются, если ресурсов не хватает. Важно понимать, что модель M/M/8 не выбирает генератор и не строит маршрут передачи энергии. Она оценивает текущую загрузку системы, решает, можно ли обслужить поступившую заявку, и обеспечить приоритетный доступ в аварийном режиме.

После того как заявка успешно допущена и неважно, в штатном или аварийном режиме, она передается в графовый модуль. Там и определяется подходящий генератор через оптимальный маршрут передачи энергии с минимальными потерями мощности. В системе, включающей 58 шин, рассматриваются 58 домов, из которых 8 являются генераторами солнечной энергии. На основе набора данных (case 58) были получены значения выработки энергии, потребления и потерь при передаче. Затем блокчейн модуль автоматически регистрирует транзакцию между выбранным генератором и потребителем посредством смарт-контракта, выполняет расчет стоимости передаваемой электроэнергии и обеспечивает неизменяемость, прозрачность и достоверность информации о выполненной транзакции. Все связанные расходы учитываются на стороне потребителя.

Таким образом, в предложенной модели теория графов обеспечивает поиск оптимального маршрута передачи энергии, для выбора генератора блокчейн отвечает за безопасное выполнение и регистрацию энергетических транзакций, а теория телетрафика подключается только при возникновении аварийной перегрузки системы, обеспечивая управление входящим потоком IoT-запросов на основе оценки загрузки и механизма приоритетного обслуживания.

Алгоритм 1. Выбора маршрутаа передачиа энергииа с минимальнымиа потерямиа с учетома входнойа телетрафиковойа обработкиа заявока

1. Инициализация: Te– модель энергосети; NG – множество генераторов; NC – множество потребителей; Pfm – матрица потоков мощности; Pl – потери активной мощности; Popt – оптимальныйа маршрута передачиа энергии; Lmin – минимальные суммарныеа потери; λ – интенсивностьа поступления заявок от IoT-устройств; μ – интенсивностьа обслуживанияа (обработки заявок); K – числоа обслуживающих логических каналов;
G(V, E) – взвешенный граф энергосети;
μ – интенсивность обработки заявок;
ω – доля заявок высокого приоритета;
2. Входные данные:
Te, NG, NC, Pfm, Pl, λ, μ, K, ω.
3. Выходные данные:
Popt, Lmin, ng*.
4. Представить энергосетьTe в виде взвешенного графа:
G(V, E) ∈ Te.
5. Для каждого ребра графа задать вес, равныйа потеряма активной мощности:
w(e) = Pl(e).
6. Заявки от IoT-устройств поступают во входнойа модуль системы согласно пуассоновскомуа процессу:
A(t) ~ Poisson(λt).
7. Разделить входной поток заявок по приоритетам:
λ1 = ωλ – поток заявокаа высокогоа приоритета;
λ2 = (1 − ω)λ – поток заявокаа низкого приоритета.
8. Каждой заявке ri присвоить класс приоритета:
ri ∈ C1 – высокийа приоритет;
ri ∈ C2 – низкийа приоритет.
9. Описать входную обработку заявок моделью Kendall:
M/M/8.
Здесь первое M означает пуассоновский поток заявок, второе M – экспоненциальное время обработки, а 8 – число параллельных логических каналов обслуживания.
10. Вычислить коэффициент загрузки входного модуля:
ρ = λ / (Kμ),
где K = 8.
11. Определить текущее число занятых каналов N(t).
12. Если N(t) < K, то заявка принимается к обработке.
13. Если N(t) = K, то:
• заявка класса C1 отклоняется;
• заявка класса C2 помещается в очередь либо отклоняется при превышении допустимой длины очереди.
14. После принятия заявки выбрать потребителя:
nc ∈ NC.
15. Для каждого генератора:
ng ∈ NG;
определить возможный путь передачи энергии от генератора к потребителю:
P(ng, nc).
16. Для каждого пути вычислить суммарные потери:
L(ng, nc) = Σ w(u, v),
где (u, v) ∈ P(ng, nc).
17. Найти генератор, обеспечивающий минимальные потери:
ng* = argmin L(ng, nc).

18. Определить оптимальный маршрут передачи энергии:
Popt = P(ng*, nc).
19. Зафиксировать минимальные потери:
Lmin = L(ng*, nc).
20. Передать данные об оптимальном генераторе, маршруте и потерях в блокчейн-модуль.
21. Смарт-контракт автоматически фиксирует сделку между потребителем и выбранным генератором, выполняет расчет стоимости и подтверждает передачу энергии.
22. Возврат результата:
(Popt, Lmin, ng*).

Программа написана на языке JavaScript и работает в среде Node.js, а по совместимости охватывает Windows, macOS и Linux. В ней задействованы следующие библиотеки:

- Inquirer — для интерактивного интерфейса;
- fs-extra — для работы с файловой системой;
- path — для обработки путей;
- chalk — для форматирования текста;
- axios — для выполнения HTTP-запросов.

Из основного функционала: программа создает структуру проекта, генерирует стандартные файлы и каталоги, а также позволяет настраивать все это через интерфейс командной строки (CLI). При этом она не привязана к конкретному редактору, может поти любая среда разработки, включая Visual Studio Code. Для запуска нужны Node.js версии 14.x и пакетный менеджер npm.

По железу требования скромные, достаточно двухъядерного процессора 2 ГГц, 4 ГБ оперативной памяти и 500 МБ свободного места на диске. Работать программа может и без подключения к интернету, это нужно только на этапе установки зависимостей и при выполнении HTTP-запросов. При этом сама генерация проекта занимает менее пяти секунд.

Для создания и исполнения соглашений между сторонами программа использует смарт-контракты. В основе разработки лежат TypeScript, Solidity и JavaScript, а вместе они дают возможность встроить блокчейн функциональность прямо в веб-приложение.

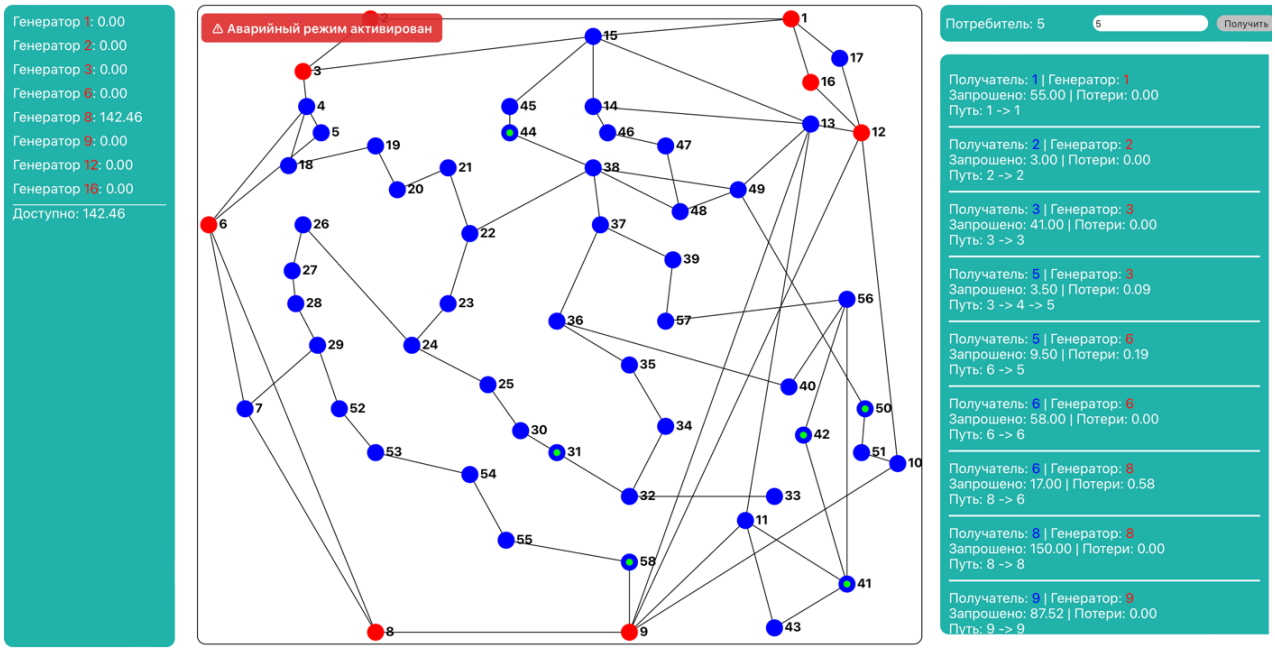

Рисунок 4.8 – Интерфейс программного комплекса

Структура проекта включает несколько ключевых компонентов.

Backend построен на смарт-контрактах, реализованных на языке Solidity. Именно они управляют ключевыми бизнес-процессами, такими как учет электроэнергии, автоматизация расчетов и сопоставление поставщиков с потребителями. При этом смарт-контракты одновременно обеспечивают безопасность транзакций и гарантируют, что условия соглашений будут выполнены.

Frontend представляет собой веб-интерфейс на Vite и React. Через него пользователь получает удобный доступ к данным о потреблении электроэнергии, может управлять счетами и взаимодействовать с блокчейн системой.

За развертывание смарт-контрактов отвечает Truffle. С ним публикация в тестовых или основных сетях блокчейна проходит проще. А для локального тестирования применялся Ganache, эмулятор Ethereum, который позволяет проводить быстрые и контролируемые эксперименты без подключения к реальной сети.

На этапе поступления запросов от IoT-устройств формируется входной поток заявок, который служит основой для последующей телетрафиковой обработки и маршрутизации в системе, как показано на рисунке 4.9.

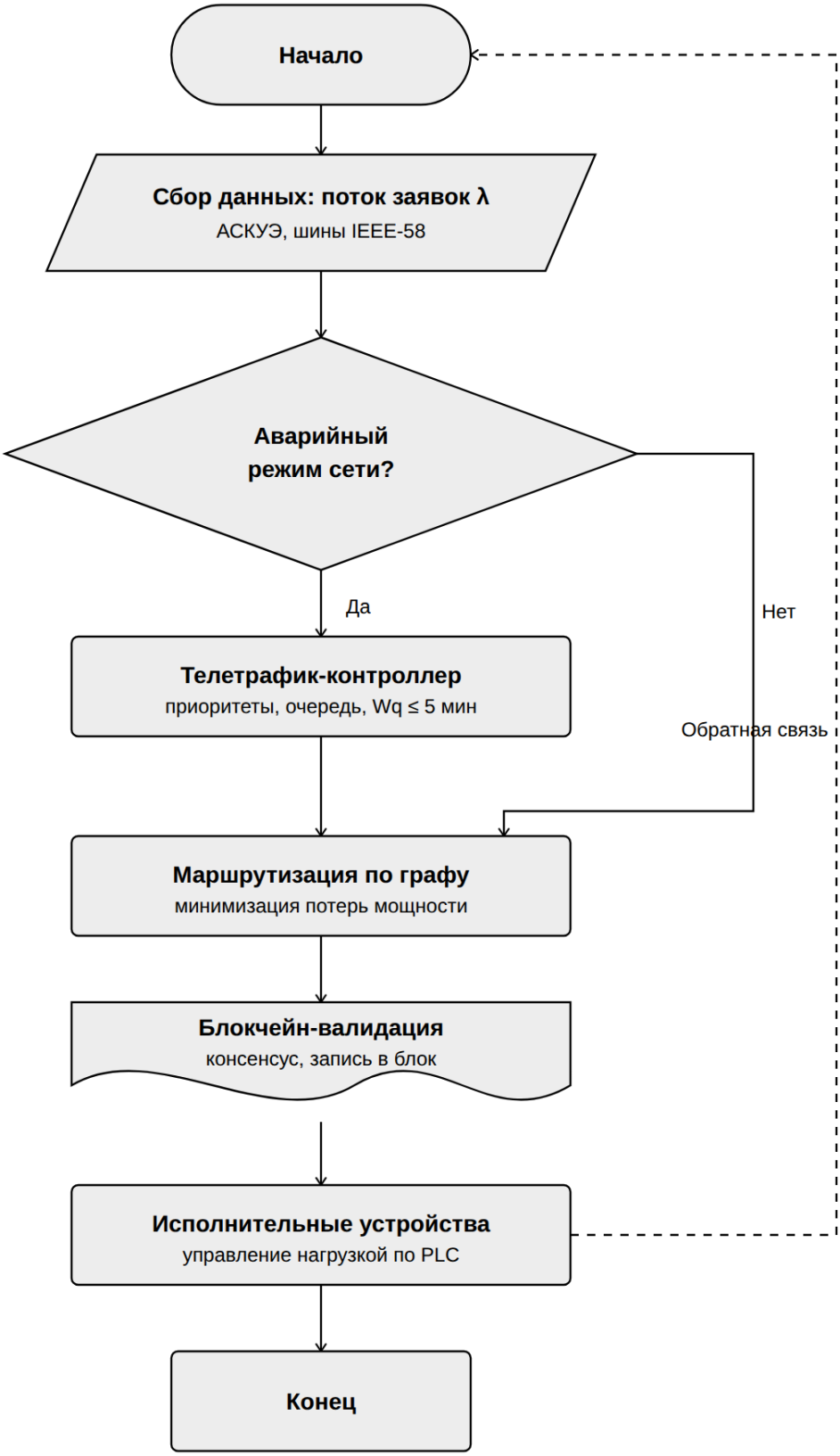

Рисунок 4.9 – Алгоритм работы предлагаемой программы

На рисунках 4.10–4.12 представлены результаты экспериментальной апробации разработанного подхода, включающие конфигурацию локальной блокчейн сети, реализацию смарт-контракта и записи транзакций, подтверждающие успешное выполнение соглашений между генераторами и потребителями энергии. Панель управления Ganache предоставляет средства для мониторинга и верификации процессов формирования блоков, изменения состояний учетных записей, потребления газа и выполнения операций взаимодействия со смарт-контрактами. Представленные результаты подтверждают работоспособность разработанного механизма на основе технологии блокчейн и обеспечивают воспроизводимость вычислительного эксперимента, прозрачность выполняемых транзакций и возможность последующего аудита всех этапов исполнения соглашений между участниками рынка.

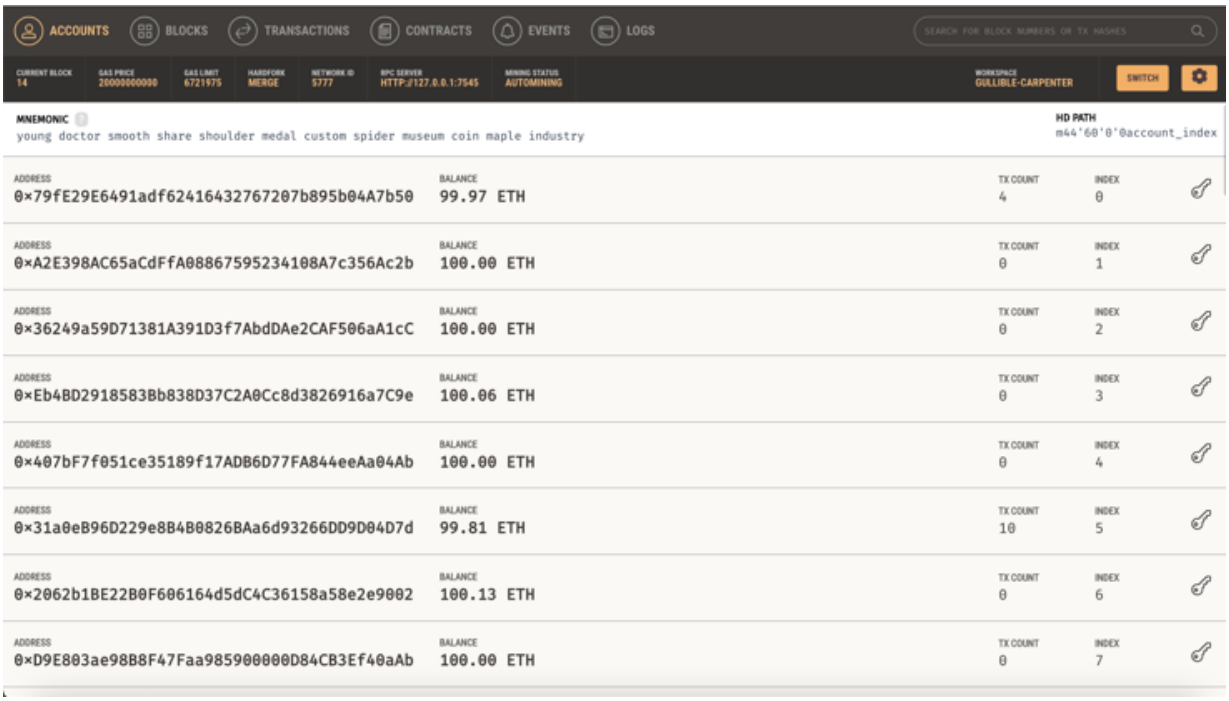

Рисунок 4.10 – Блокчейн среда Ganache, отображающая аккаунты и их балансы

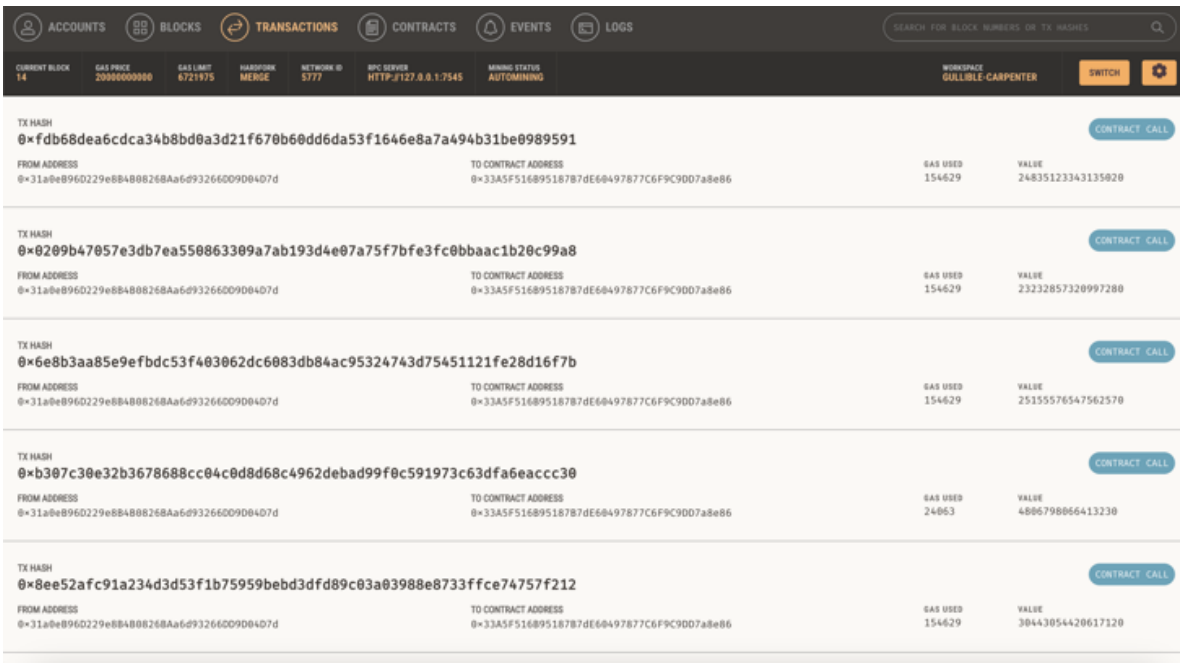

Рисунок 4.11 – Развертывание смарт-контракта в блокчейне Ganache

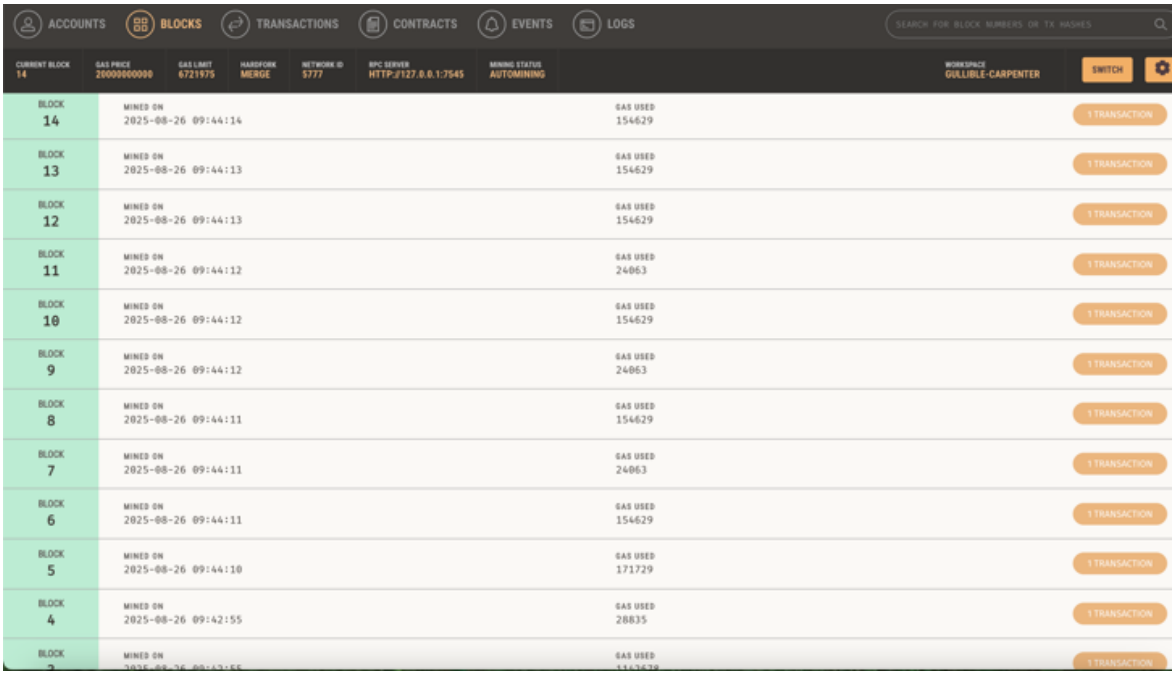

Рисунок 4.12 – Журнал транзакций и сведения о блоках, подтверждающие успешное выполнение смарт контракта.

На рисунке 4.13 представлено сравнение трех вариантов системы: базовой модели (Baseline), модели с применением теории графов (Graph Theory) и предлагаемой модели, объединяющей теорию графов и теорию телетрафика (Graph Theory + Teletraffic). Полученные результаты показывают, что последовательное внедрение механизмов оптимизации приводит к улучшению всех исследуемых показателей производительности блокчейн платформы интеллектуальной сети.

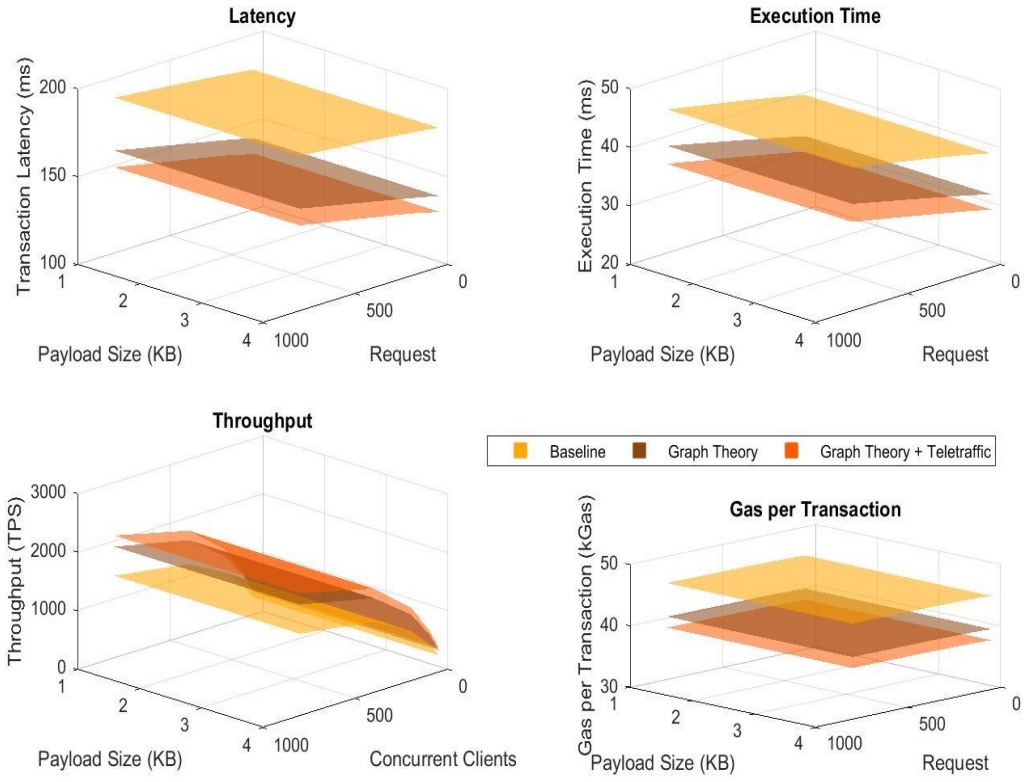

Рисунок 4.13 – Сравнение показателей производительности базовой системы, графовой модели и модели на основе теории графов и телетрафика

Для подтверждения результатов, представленных на рисунке 4.13, в таблице 4.1 приведены количественные значения исследуемых показателей.

Таблица 4.1 – Сравнительный анализ производительности результатов

Количество запросов	**Время выполнения (мс) — базовая система**	**Время выполнения (мс) — Графовая с блокчейн система**	**Время выполнения (мс) — предлагаемая система**	**Задержка (мс) — базовая система**	**Задержка (мс) — Графовая с блокчейн система**	**Задержка (мс) — предлагаемая система**	**Пропускная способность (TPS) — базовая система**	**Пропускная способность (TPS) — Графовая с блокчейн система тема**	**Пропускная способность (TPS) — предлагаемая система**	**Потребление газа (kGas) — базовая система**	**Потребление газа (kGas) — Графовая с блокчейн система**	**Потребление газа (kGas) — предлагаемая система**
50	39.47	32.46	29.87	179.39	140.59	131.82	292.45	382.13	421.54	45.2	39.78	37.96
100	39.9	32.91	30.28	180.2	141.91	132.89	525.44	689.6	759.21	45.31	39.87	38.06
200	40.64	33.73	31.03	181.58	144.35	135.69	858.96	1136.05	1249.66	45.42	39.97	38.17
400	42	35.28	32.46	183.96	149.01	140.07	1205.02	1612.21	1773.43	45.54	40.07	38.27
800	44.49	38.26	35.20	188.28	158.15	148.66	1400.62	1895.43	2084.97	45.66	40.18	38.38

На основе результатов экспериментальных измерений рассчитано относительное изменение ключевых показателей производительности по сравнению с базовой системой. Результаты представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Процентное изменение показателей производительности относительно базовой системы

Количество запросов	**Улучшение времени выполнения (%)**	**Улучшение задержки (%)**	**Улучшение пропускной способности TPS (%)**	**Снижение потребления газа (%)**
50	24,3	26,5	44,1	16
100	24,1	26,3	44,5	16
200	23,6	25,3	45,5	16
400	22,7	23,9	47,2	16
800	20,9	21	48,9	16

Если смотреть на задержку транзакций (Latency), самой медленной оказывается базовая система, которая равна 175–190 мс. Переход на теорию графов сокращает этот показатель до 140–155 мс, маршруты теперь выбираются до оптимального генератора с минимальными потерями. А если добавить еще и методы теории телетрафика, задержка падает еще ниже, до 130–145 мс, поскольку тут уже работает управление входящими потоками заявок и защита от перегрузки системы. В среднем по сравнению с базовым вариантом задержка снижается примерно на 25%.

Похожая картина и со временем выполнения транзакций (Execution Time). В базовой системе обработка запроса занимает 40–45 мс, после внедрения графовой маршрутизации показатель падает до 32–36 мс, а лучший результат дает именно комбинированная модель «теория графов + теория телетрафика» 29–33 мс. Это говорит о том, что вычислительные ресурсы используются эффективнее, а нагрузка на смарт-контракты снижается.

С пропускной способностью (Throughput) логика обратная. Чем выше значение, тем лучше работает система. У базового варианта она колеблется в пределах 300–1300 транзакций в секунду. Графовая модель поднимает планку до 1800 транзакций в секунду, а максимум показывает опять же комбинированная модель, которая свыше 2000 транзакций в секунду. Получается, что механизмы теории телетрафика действительно помогают системе не упираться в насыщение и лучше справляться с параллельными запросами.

Затраты газа на транзакцию (Gas per Transaction) снижаются последовательно с каждым добавленным методом. В базовой системе на транзакцию уходит около 44–46 kGas, теория графов снижает это значение до 39–40 kGas, а минимум опять же достигается в комбинированной модели, равной 37–39 kGas, что дает экономию порядка 15–18% по сравнению с базовым вариантом.

В сумме все четыре показателя указывают в одну сторону, что интеграция теории графов и теории телетрафика превосходит остальные подходы по каждому из измеренных параметров. Задержка и время обработки

транзакций сокращаются, пропускная способность растет, а потребление газа падает и все это одновременно. Эти результаты подтверждают, что предложенный подход имеет смысл применять именно в масштабируемых блокчейн ориентированных интеллектуальных сетях, где интенсивность запросов высока.

Выводы по главе 4

В четвертой главе проведена экспериментальная оценка предложенной блокчейн архитектуры маршрутизации с приоритезацией трафика, а ее характеристики сопоставлены с показателями базовой системы. Показано, что реализация подхода на основе разрешенной Ethereum-сети с механизмом Proof-of-Authority обеспечивает корректное функционирование смарт-контрактов при моделировании процессов управления распределения потоков.

Установлено, что предложенная система реализует трехуровневую архитектуру обработки транзакций, включающую телетрафиковый уровень входной обработки заявок, графовый уровень оптимизации маршрутизации и блокчейн уровень фиксации и исполнения смарт-контрактов. Такое разделение обеспечивает декомпозицию функций управления нагрузкой, оптимизации потоков и верификации транзакций, повышая структурную прозрачность системы.

Выявлено, что телетрафическая модель M/M/8 используется исключительно для моделирования входного потока IoT-заявок и оценки загрузки системы, при этом не оказывает влияния на выбор маршрута передачи энергии. Маршрутизация осуществляется независимо на уровне графовой модели сети, что обеспечивает разделение процессов допуска заявок и оптимизации физических потоков мощности.

Установлено, что повышение производительности системы достигается за счет четкого разделения вычислительных задач между off-chain компонентами, выполняющими графовую оптимизацию маршрутов, и on-chain компонентами, обеспечивающими фиксацию, проверку и аудит транзакций. Такой подход снижает нагрузку на блокчейн уровень и повышает общую эффективность обработки запросов.

Локальная тестовая среда Ethereum на базе Ganache и Truffle позволила верифицировать корректность работы смарт-контрактов и получить воспроизводимые оценки производительности системы.

При этом стоит учитывать: полученные результаты отражают оптимизированные условия исполнения, и при переходе к распределенной многозвенной сети валидаторов их еще предстоит уточнить.

Тем не менее предложенная архитектура обладает потенциалом масштабирования при переходе к распределенным PoA-кластерам и может быть адаптирована для работы в реальных системах с динамически меняющейся топологией и нагрузкой.

В целом результаты четвертой главы подтверждают работоспособность и эффективность предложенного подхода, показывают его преимущества по сравнению с базовой системой и закладывают основу для дальнейших исследований и практического внедрения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель и задачи диссертационного исследования достигнуты в полном объеме. Работа была направлена на изучение эффективности применения методов теории телетрафика и блокчейн технологий в коммуникационной инфраструктуре интеллектуальных сетей Smart Grid, и в процессе ее выполнения были решены три взаимосвязанные задачи. Ниже последовательно рассмотрен каждый из полученных результатов.

Первая задача заключалась в изучении того, как интенсивность входящего трафика, задержки передачи данных и пропускная способность сети влияют на показатели работы коммуникационной системы Smart Grid. Для ее решения была разработана расширенная модель массового обслуживания M/M/V с двухуровневой системой приоритетов заявок. Такая модель позволяет по-разному обрабатывать критически важные и второстепенные информационно-энергетические запросы, не смешивая их в общем потоке. Проведенный анализ показал, что рост интенсивности входящего потока ведет к увеличению задержки передачи данных и снижению эффективности функционирования коммуникационной системы. Помимо этого, удалось определить пороговые значения нагрузки, после превышения которых система переходит в критический режим работы. Полученная зависимость между интенсивностью трафика, задержкой и пропускной способностью сети имеет и самостоятельное практическое значение. Она позволяет заранее увидеть, где в коммуникационной инфраструктуре могут возникнуть узкие места, и принять меры по управлению входящей нагрузкой еще до того, как ситуация станет критической.

Решение второй задачи потребовало разработки и реализации алгоритма оптимизации исполнения смарт-контрактов в блокчейн инфраструктуре интеллектуальной сети Smart Grid. В основу алгоритма легли три уровня обработки. Телетрафиковый уровень отвечает за допуск и приоритизацию заявок. Графовый уровень занимается маршрутизацией энергетических потоков. Блокчейн уровень фиксирует и верифицирует транзакции. Электроэнергетическая система при этом представлена в виде взвешенного ориентированного графа, где узлами являются шины сети, а весами ребер служат потери активной мощности. Такое представление позволило применить алгоритм Дейкстры для поиска маршрутов передачи энергии с минимальными потерями между генераторами и потребителями. Найденные маршруты фиксируются и проходят верификацию посредством смарт-контрактов в разрешенной блокчейн сети, построенной на механизме подтверждения полномочий Proof of Authority. Это обеспечивает неизменяемость, проверяемость и аудируемость принимаемых решений, а время подтверждения транзакций при этом остается предсказуемым. Отдельного внимания заслуживает то, как в предложенной архитектуре распределены вычислительные задачи. Расчет установившихся режимов и обновление весов графа выполняются вне блокчейна, тогда как фиксация и верификация

транзакций происходит непосредственно внутри него. Такое разделение снижает нагрузку на блокчейн уровень системы и заметно повышает общую производительность архитектуры.

Для решения третьей задачи была проведена экспериментальная оценка эффективности разработанной модели в тестовой среде Ethereum, развернутой на базе Ganache и Truffle с использованием библиотеки Web3.js. Полученные результаты сравнивались с показателями базовой централизованной системы, реализованной на том же оборудовании и по тем же алгоритмам расчета, что обеспечивало корректность сопоставления. Время обработки запросов сократилось на 24 процента, задержка передачи данных снизилась на 26 процентов, а пропускная способность коммуникационной системы выросла на 48 процентов по сравнению с базовой моделью. Задержка исполнения транзакций уменьшилась в среднем на 22 процента, снизившись примерно с диапазона от 150 до 270 миллисекунд до диапазона от 130 до 230 миллисекунд. Время выполнения тестовых операций сократилось на 18 процентов, а именно с диапазона от 40 до 65 миллисекунд до диапазона от 34 до 55 миллисекунд. Пропускная способность блокчейн уровня выросла с диапазона от 300 до 1300 транзакций в секунду у базовой системы до диапазона от 400 до почти 1900 транзакций в секунду у предложенной системы, а при высоких нагрузках прирост производительности достигал 30 процентов. Затраты газа на выполнение полного цикла транзакции сократились с 220 000 до 170 000 единиц, а удельные затраты газа на одну транзакцию снизились примерно на 12 процентов. Время развертывания смарт-контрактов не превысило 450 миллисекунд, а время их исполнения не превысило 300 миллисекунд. Это подтверждает пригодность предложенной архитектуры для задач управления энергосистемой, близких к режиму реального времени. Дополнительно была выполнена оценка влияния предложенного подхода на снижение углеродных выбросов. В зависимости от сценария нагрузки и доли возобновляемых источников энергии в энергобалансе сокращение выбросов CO2 составило от 15 до 40 процентов при высокой перегрузке сети и от 30 до 60 процентов при доле ВИЭ выше 80 процентов. Все перечисленные результаты подтверждены статистической валидацией и по каждому из рассмотренных показателей превосходят результаты базовой системы. Это говорит о работоспособности и практической эффективности предложенного подхода.

Совокупность полученных результатов подтверждает научную новизну проведенного исследования. Была установлена аналитическая зависимость между интенсивностью входящего трафика, задержкой передачи данных и пропускной способностью коммуникационной сети Smart Grid, позволяющая заранее определять переход системы в критический режим работы. Разработан алгоритм управления маршрутами передачи энергетических запросов, основанный на графовой модели сети связи и последующей блокчейн верификации принятых решений. Предложена комплексная модель управления информационно-энергетическими потоками в коммуникационной инфраструктуре Smart Grid, в которой методы теории телетрафика, графовой

маршрутизации и механизмов распределенной верификации объединены в единую архитектуру. Именно это отличает предложенный подход от существующих решений. Как показал анализ, выполненный в первой и второй главах диссертации, каждое из рассмотренных ранее решений охватывает лишь отдельные аспекты управления интеллектуальной энергосистемой и не обеспечивает их комплексной интеграции.

Практическая значимость исследования подтверждается тем, что разработанное программное решение на основе MatLab и MatPower уже внедрено в корпоративную среду компании Internet Training Center, где оно используется для моделирования и оптимизации потоков электроэнергии. Данный факт подтвержден соответствующим актом внедрения. Кроме того, разработанная архитектура может применяться организациями, эксплуатирующими распределенные энергетические сети с высокой долей возобновляемых источников энергии, для повышения качества обслуживания коммуникационной инфраструктуры и обеспечения прозрачности энергетических транзакций между участниками энергетического рынка, включая просьюмеров.

При этом необходимо честно оговорить одно обстоятельство. Представленные результаты получены в условиях локальной тестовой PoA-среды с единственным узлом-валидатором. Это позволяет оценить функциональную корректность и работоспособность предложенной архитектуры, но не в полной мере отражает ее поведение в условиях георасределенной сети валидаторов с характерными для нее сетевыми задержками, конкуренцией за вычислительные ресурсы и накладными расходами консенсуса. Поэтому приведенные показатели задержки и потребления газа правильнее рассматривать как оптимистичные нижние оценки, которые еще предстоит уточнить при переходе к распределенной многозвенной сети валидаторов и при масштабных промышленных развертываниях.

С учетом сказанного можно выделить несколько перспективных направлений для дальнейших исследований. Одно из них связано с апробацией предложенной архитектуры в условиях многоузловой распределенной сети валидаторов, в том числе на публичных тестовых сетях Ethereum. Другое направление предполагает сравнительный анализ эффективности предложенного подхода при использовании альтернативных механизмов консенсуса, таких как Proof of Stake и Delegated Proof of Stake, а также иных блокчейн платформ, включая Hyperledger Fabric. Отдельного изучения заслуживает устойчивость разработанной телетрафиковой модели к отклонениям входящего потока заявок от пуассоновского распределения. Практический интерес представляет и экономическая оценка внедрения предложенного решения, включающая расчет капитальных и эксплуатационных затрат, а также ориентировочного срока окупаемости. Наконец, архитектуру можно расширить для применения в масштабах региональной энергосистемы, учитывая при этом реальную топологию сети и

данные, поступающие от физических IoT-устройств. Реализация перечисленных направлений позволит уточнить и расширить область практического применения разработанной модели управления информационно-энергетическими потоками интеллектуальных сетей Smart Grid, а также создаст предпосылки для ее внедрения в промышленную эксплуатацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] United Nations Climate Change, «Chto takoe Parizhskoe soglashenie?», https://unfccc.int/ru/informaciya-ob-onuv/chto-takoe-parizhskoe-soglashenie.

[2] Oficial'nyi sait Prazidenta RK, «Poslanie Prezidenta Respubliki Kazakhstan – lidera nacij Nursultana Nazarbaeva narodu Kazakhstana "Strategiya Kazakhstan-2050": novyj politicheskij kurs sostoyavshegosya gosudarstva», https://www.akorda.kz/ru/events/astana_kazakhstan/participation_in_events/poslanie-prezidenta-respubliki-kazahstan-lidera-nacii-nursultana-nazarbaeva-narodu-kazahstana-strategiya-kazahstan-2050-novyi-politicheskii-.

[3] H. Zheng, «Research on low-carbon development path of new energy industry under the background of smart grid», *J King Saud Univ Sci*, vol. 36, no. 3, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.jksus.2024.103105.

[4] SlideGeeks, «Renewable energy and Smart Grid Technology framework information PDF», https://www.slidegeeks.com/renewable-energy-and-smart-grid-technology-framework-information-pdf.

[5] N. P. Chadalavada and N. Ramachandran, «An Efficient Neighbor Nodes Trust Tagging Model for Optimized Route Detection in Smart Grids with Secure Data Transmission», *Heliyon*, p. e32074, May 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e32074.

[6] N. Rodriguez-Perez *et al.*, «Measuring the digitalisation of electricity distribution systems in Europe: Towards the smart grid», *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 159, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.ijepes.2024.110009.

[7] J. Zhang, W. Zhang, X. Wei, and H. Liu, «EPri-MDAS: An efficient privacy-preserving multiple data aggregation scheme without trusted authority for fog-based smart grid», *High-Confidence Computing*, p. 100226, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.hcc.2024.100226.

[8] J. Powell, A. McCafferty-Leroux, W. Hilal, and S. A. Gadsden, «Smart grids: A comprehensive survey of challenges, industry applications, and future trends», *Energy Reports*, vol. 11, pp. 5760–5785, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.egyr.2024.05.051.

[9] D. Lee, Y. Chiang, Y. T. Chen, and H. H. Tsai, «Impacts of battery energy storage system on power grid smartness: Case study of Taiwan Power Company», *J Energy Storage*, vol. 86, May 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.111188.

[10] I. Energy Agency, «Clean Energy Market Monitor – March 2024», 2024. [Online]. Available: www.iea.org

[11] Атомная энергия 2.0, «Международное энергетическое агентство прогнозирует новый рекордный уровень атомной генерации в 2025 году», https://www.atomic-energy.ru/news/2024/02/01/142640.

[12] Kapital.kz, «В Туркестанской области построят солнечную электростанцию мощностью 50 МВт», https://kapital.kz/economic/115805/v-turkestanskoy-oblasti-postroyat-solnechnuyu-elektrostantsiyu-moshchnost-yu-50-mvt.html.

[13] Wikipedia, «Сарань (солнечная электростанция)», https https://ru.wikipedia.org/wiki/Сарань_(солнечная_электростанция).

[14] Hevel, «Солнечная электростанция “Нура” (Республика Казахстан)», https://www.hevelsolar.com/projects/solnechnaya-elektrostanciya-nura-respublika-kazakhstan/.
[15] United Nations Development Programme, «В Казахстане усовершенствовали систему инвестирования в возобновляемые источники энергии», https://www.undp.org/ru/kazakhstan/stories/v-kazakhstane-usovershenstvovali-sistemu-investirovaniya-v-vozobnovlyaemye-istochniki-energii.
[16] nk@vkcyprus.com, «Субсидии на энергосбережение и модернизацию: планы на 2024 год», https://sb-cyprus.com/business/7642-subsidii-na-energosberezhenie-i-modernizatsiyu-plany-na-2024-god.
[17] Сегеда Т. А., Прохоренкова Л. В., Куликова В. Н., Гранецкий Н. В., «Энергия үнемдеу және энергия тиімділігі: оқу құралы». Өскемен: ШҚМТУ баспасы, 2017. Accessed: Jul. 10, 2024. [Online]. Available: ШҚМТУ баспасы.
[18] Қазақстан Республикасы Әділет министрлігі, «Энергия үнемдеу және энергия тиімділігін арттыру туралы», https://adilet.zan.kz/kaz/docs/Z1200000541.
[19] United Nations Development Programme, «Энергия үнемдейтін жабдықтар экологиялық мәселелерді шешу әдісі ретінде», https://www.undp.org/kk/kazakhstan/stories/energiya-unemdeytin-zhabdyktar-ekologiyalyk-mselelerdi-sheshu-disi-retinde.
[20] САМРУК-ҚАЗЫНА, «Энергия тиімділігін басқару»,https://sk.kz/investors/OUR-2023_SC/kz/007-3-upravlenie_energoeffektivnostyu.php.
[21] Камшат Сатиева, «Қазақстанда электр энергиясын сақтау жүйесі пайда болады», https://kaz.zakon.kz/quqiq/6043591-azastanda-elektr-energiyasyn-satau-zhyes-payda-bolady.html.
[22] H. Taherdoost, «A systematic review of big data innovations in Smart Grids», Jun. 01, 2024, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.rineng.2024.102132.
[23] N. Shi, L. Tan, W. Li, X. Qi, and K. Yu, «A blockchain-empowered AAA scheme in the large-scale HetNet», *Digital Communications and Networks*, vol. 7, no. 3, pp. 308–316, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.dcan.2020.10.002.
[24] M. Güçyetmez and H. S. Farhan, «Enhancing Smart Grids with a new IOT and cloud-based smart meter to predict the energy consumption with time series», *Alexandria Engineering Journal*, vol. 79, pp. 44–55, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.aej.2023.07.071.
[25] M. Mussi, L. Pellegrino, O. F. Pindaro, M. Restelli, and F. Trovò, «A Reinforcement Learning controller optimizing costs and battery State of Health in Smart Grids», *J Energy Storage*, vol. 82, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.110572.
[26] R. I. Alkanhel, E. S. M. El-Kenawy, M. M. Eid, L. Abualigah, and M. A. Saeed, «Optimizing IoT-driven Smart Grid stability prediction with dipper throated optimization algorithm for gradient boosting hyperparameters», *Energy Reports*, vol. 12, pp. 305–320, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.egyr.2024.06.034.
[27] A. Akkad, G. Wills, and A. Rezazadeh, «An information security model for an IoT-enabled Smart Grid in the Saudi energy sector», *Computers and Electrical Engineering*, vol. 105, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.compeleceng.2022.108491.

[28] C. Bekara, «Security issues and challenges for the IoT-based smart grid», in *Procedia Computer Science*, Elsevier B.V., 2014, pp. 532–537. doi: 10.1016/j.procs.2014.07.064.
[29] P. Yang, S. Li, S. Qin, L. Wang, M. Hu, and F. Yang, «Smart grid enterprise decision-making and economic benefit analysis based on LSTM-GAN and edge computing algorithm», *Alexandria Engineering Journal*, vol. 104, pp. 314–327, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.aej.2024.06.028.
[30] M. O. Qays, I. Ahmad, A. Abu-Siada, M. L. Hossain and F. Yasmin, «Key communication technologies, applications, protocols and future guides for IoT-assisted smart grid systems: A review», Dec. 01, 2023, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.egyr.2023.01.085.
[31] M. Konyrova, S. Kumyzbayeva, T. Iliev and K. Chezhimbayeva, «Effeciency assessment of iot devices control with Teletraffic Theory», *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 3, no. 9 (123), pp. 49–59, 2023, doi: 10.15587/1729-4061.2023.281287.
[32] M. Konyrova, S. Kumyzbayeva, G. Daukeyev, V. Stoyak and E. Kadylbekkyzy, «Analysis of Direct Load Control in Smart Grids by using Teletraffic Theory», 20221. Accessed: Jul. 18, 2024. [Online]. Available: 10.1145/3492547.3492571
[33] G. Neglia, L. Giarré, I. Tinnirello and G. Di Bella, «Teletraffic engineering for direct load control in Smart Grids», *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 16, pp. 167–176, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.segan.2018.07.007.
[34] I. Tinnirello, G. Neglia, L. Giarré, G. Di Bella, A. Jean-Marie, and M. G. Ippolito, «Large scale control of deferrable domestic loads in Smart Grids», *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 9, no. 2, pp. 733–742, May 2016, doi: 10.1109/TSG.2016.2563039.
[35] C. Núñez-Gómez, M. de Vos, J. Decouchant, J. Pouwelse, B. Caminero and C. Carrión, «LIGHT-HIDRA: Scalable and decentralized resource orchestration in Fog-IoT environments», *Future Generation Computer Systems*, vol. 160, pp. 76–91, Nov. 2024, doi: 10.1016/j.future.2024.05.041.
[36] M. Nir and A. Matrawy, «Centralized management of scalable cyber foraging systems», in *Procedia Computer Science*, Elsevier B.V., 2013, pp. 265–273. doi: 10.1016/j.procs.2013.09.035.
[37] T. Hoßfeld, P. E. Heegaard, M. Varela, and M. Jarschel, «User-centric Markov reward model for state-dependent Erlang loss systems», *Performance Evaluation*, vol. 165, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.peva.2024.102425.
[38] P. Pandiyan, S. Saravanan, R. Kannadasan, S. Krishnaveni, M. H. Alsharif and M. K. Kim, «A comprehensive review of advancements in green IoT for smart grids: Paving the path to sustainability», Jun. 01, 2024, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.egyr.2024.05.021.
[39] W. Guo, P. Liu, and X. Shu, «Optimal dispatching of electric-thermal interconnected virtual power plant considering market trading mechanism», *J Clean Prod*, vol. 279, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123446.
[40] R. D. Zimmerman and C. E. Murillo-Sánchez, «MATPOWER User's Manual Version 7.1», 2020.
[41] R. D. Zimmerman, «Uniform Price Auctions and Optimal Power Flow», 2010.

[42] A. D. Manchalwar, N. R. Patne, S. Pemmada, R. Panigrahi, and C. Morey, «Decentralized peer-to-peer model of energy trading in smart grid considering price differentiation», *Energy Reports*, vol. 9, pp. 728–736, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.egyr.2023.05.156.
[43] P. A. Gbadega and Y. Sun, «Centralized peer-to-peer transactive energy market approach in a prosumer-centric residential smart grid environment», *Energy Reports*, vol. 8, pp. 105–116, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.10.080.
[44] N. Saeed, F. Wen, and M. Z. Afzal, «Decentralized peer-to-peer energy trading in microgrids: Leveraging blockchain technology and smart contracts», *Energy Reports*, vol. 12, pp. 1753–1764, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.egyr.2024.07.053
[45] Q. Yang and H. Wang, «Privacy-Preserving Transactive Energy Management for IoT-Aided Smart Homes via Blockchain», *IEEE Internet Things J*, vol. 8, no. 14, pp. 11463–11475, Jul. 2021, doi: 10.1109/JIOT.2021.3051323.
[46] D. Mitrea, L. Toderean, T. Cioara, I. Anghel and M. Antal, «Smart contracts and homomorphic encryption for private P2P energy trading and demand response on blockchain», *Heliyon*, vol. 9, no. 11, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e22357.
[47] Y. J. Su, C. H. Chen, T. Y. Chen, and C. W. Yeah, «Applying Ethereum blockchain and IPFS to construct a multi-party used-car trading and management system», *ICT Express*, vol. 10, no. 2, pp. 306–311, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.icte.2023.12.007.
[48] A. Jindal, G. S. Aujla, N. Kumar, and M. Villari, «GUARDIAN: Blockchain-Based Secure Demand Response Management in Smart Grid System», *IEEE Trans Serv Comput*, vol. 13, no. 4, pp. 613–624, Jul. 2020, doi: 10.1109/TSC.2019.2962677.
[49] C. Pop, T. Cioara, M. Antal, I. Anghel, I. Salomie and M. Bertoncini, «Blockchain based decentralized management of demand response programs in smart energy grids», *Sensors (Switzerland)*, vol. 18, no. 1, Jan. 2018, doi: 10.3390/s18010162.
[50] A. Kumari *et al.*, «Blockchain-Based Peer-to-Peer Transactive Energy Management Scheme for Smart Grid System», *Sensors*, vol. 22, no. 13, Jul. 2022, doi: 10.3390/s22134826.
[51] D. G. Baur and J. R. Karlsen, «Do crypto investors care about energy use and climate change? Evidence from Ethereum's transition to proof-of-stake», *J Environ Manage*, vol. 369, p. 122299, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.jenvman.2024.122299.
[52] A. Jain, C. Jain and K. Krystyniak, «Blockchain transaction fee and Ethereum Merge», *Financ Res Lett*, vol. 58, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.frl.2023.104507.
[53] P. Kumar, R. Kumar, A. Aljuhani, D. Javeed, A. Jolfaei and A. K. M. N. Islam, «Digital twin-driven SDN for smart grid: A deep learning integrated blockchain for cybersecurity», *Solar Energy*, vol. 263, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.solener.2023.111921.
[54] Алиев Т. И., «Основы моделирования дискретных систем»: учебное пособие. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. – 363 с. – ISBN 978-5-7577-0336-7. – Режим доступа: https://books.ifmo.ru/book/445/osnovy_modelirovaniya_diskretnyh_sistem.htm.
[55] Лидский Э. А., «Задачи трафика в сетях связи»: учебное пособие. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ ГОУ ВПО, 2006. – 202 с. – Режим доступа: https://study.urfu.ru/Aid/Publication/414/1/Lidsky.pdf.

[56] Берлин А. Н., «Математика рынка. Обслуживание случайных потоков», Издательские решения (Ridero), 2017 – электронная книга, 168 с., ISBN 978-5-4485-2545-2, https://ridero.ru/books/matematika_rynka/.
[57] D. Han, D. Koo, C. Shin and D. Won, «Hierarchical robust Day-Ahead VPP and DSO coordination based on local market to enhance distribution network voltage stability», International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 160, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.ijepes.2024.110076.
[58] M. Ebrahimi, M. Ebrahimi, M. Shafie-khah and H. Laaksonen, «EV-observing distribution system management considering strategic VPPs and active & reactive power markets», Applied Energy, vol. 364, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.123152.
[59] Soltek Energy, «How You Earn Money with a Virtual Power Plant», https://www.soltekenergy.com.au/virtual-power-plants/
[60] H. Pereira, B. Ribeiro, L. Gomes and Z. Vale, «CECOS: A Centralized Management Platform Supported by Distributed Services to Represent and Manage Resources Aggregation Entities and its End-users in a Smart Grid Context», IFAC-PapersOnLine, 2022, pp. 309–314, doi: 10.1016/j.ifacol.2022.07.054.
[61] A. Akhtari, S. Sadi, and H. Askarian-Abyaneh, "Penetration and Impact of Electric Vehicle Loads on System Operation: Optimal Design and Modeled as M/M/C Queue Theory," in Smart Grid Conference (SGC), 2024, doi: 10.1109/SGC64640.2024.10983537.
[62] Jenergonews. Kak virtual'nye jelektrostancii dayut real'nuyu jeconomiyu I nadezhnost'. http://energo-news.ru/archives/151588 (accessed 19 April 2019).
[63] Fond jenergiya bez granic. Real'nye vygody virtual'noi jelectrrostancii. https://energy-fund.ru/info/articles/eto-interesno/realnye-vygody-virtualnoy-elektrostantsii/ (accessed 9 August 2016).
[64] Habr. Tesla ob#edinit 50 000 domov bednyakov v Yuzhnoi Avstralii v virtual'nuyu jelectrostanciyu na 250 MVt. https://habr.com/ru/post/409955/ (accessed 5 February 2018).
[65] Vedomosti. Domohozyajstva perehodyat na samoobespechenie jelectrichestvom. https://www.vedomosti.ru/business/articles/2018/01/07/747134-domohozyaistva-samoobespechenie-elektrichestvom (accessed 28 June 2021).
[66] Electrovesti.net. Virtual'naya jelektrostanciya – chto jeto, i zachem. Voprosy, kotorye vy stesnyalis' zadat'. https://elektrovesti.net/62503_virtualnaya-elektrostantsiya-chto-eto-i-zachem-voprosy-kotorye-vy-stesnyalis-zadat (accessed 30 August 2018).
[67] X. J. Lin, N. Zhang, Y. H. Mao, J. Y. Chen, X. T. Tian and W. Zhong, «A review of the transformation from urban centralized heating system to integrated energy system in smart city», Applied Thermal Engineering, 2024, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.122272.
[68] W. Zhong, J. Chen, Y. Zhou, Z. Li, Z. Yu and X. Lin, «Investigation of optimized network splitting of large-scale urban centralized heating system operation», Energy Reports, vol. 6, pp. 467–477, 2020, doi: 10.1016/j.egyr.2020.02.012.

[69] Лившиц Б. С., Пшеничников А. П., Харкевич А. Д. Теория телетрафика. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Связь, 1979. – 224 с. – URL: https://search.rsl.ru/ru/record/01007759396

[70] М. А. Плескунов, «Теория массового обслуживания : учебное пособие», Издательство Уральского университета, Екатеринбург, 2022, 264 с., ISBN 978-5-7996-3539-8 – https://www.iprbookshop.ru/156963.html.

[71] Туманбаева К.Х., Лещинская Э.М. Теория телетрафика: учебное пособие для студентов образовательной программы 6В06201 «Радиотехника, электроника и телекоммуникации». — Алматы: АУЭС, 2021. — 81 с. ISBN 978-601-7939-88-5.

[72] S. Varshney, M. Shah, K. K. Choudhary, M. Gupta, A. Bavisi, and B. A. Srinivas, "Queueing Network Analysis for Electric Vehicle Management Systems using G-Queues," in 2025 International Conference on Sustainable Energy Technologies and Computational Intelligence (SETCOM), 2025, doi: 10.1109/SETCOM64758.2025.10932349.

[73] **Singh V.** «*Smart Grid Traffic Modeling in GSM and LTE using Multidimensional Markovian Process*»: Master's Thesis. – Hyderabad, India: Indian Institute of Technology Hyderabad, Department of Electrical Engineering, 2015. – 86 p. – URL: https://raiithold.iith.ac.in/1779/1/Vishwajeet_Thesis.pdf (дата обращения: 25.06.2026).

[74] J. Fourneau, D. Nott, «Convergence Routing under Bursty Traffic: Instability and an AIMD Controller», *Electronic Notes in Theoretical Computer Science*, vol. 151, 2006, doi: 10.1016/j.entcs.2006.03.014.

[75] C. C. T. Chow, A. Y. S. Lam, W. Liu, and K. T. Chau, "Multisource–Multidestination Optimal Energy Routing in Static and Time-Varying Vehicular Energy Network," IEEE Internet of Things Journal, vol. 9, no. 24, pp. 25196–25209, 2022. doi: 10.1109/JIOT.2022.3197242.

[76] P. D. Diamantoulakis, V. M. Charitopoulos, P. G. Sarigiannidis, et al., "Power Loss-Aware Transactive Microgrid Coalitions under Uncertainty," Energies, vol. 13, no. 18, Art. no. 4797, 2020, doi: 10.3390/en13184797.

[77] X. Chen, H. Wen, W. Ni, S. Zhang, X. Wang, S. Xu, and Q. Pei, "Distributed Online Optimization of Edge Computing With Mixed Power Supply of Renewable Energy and Smart Grid," IEEE Transactions on Communications, vol. 70, no. 2, pp. 952–967, 2022. doi: 10.1109/TCOMM.2021.3123275.

[78] C. Yang, X. Chen, X. Wang, et al., "Optimal Power Flow in Distribution Network: A Review on Problem Formulation and Optimization Methods," Energies, vol. 16, no. 16, Art. no. 5974, 2023, doi: 10.3390/en16165974.

[79] Y. Yu, Y. Li, J. Wang, et al., "A Novel Distributed Energy Routing Algorithm in Energy Networks," Electric Power Systems Research, vol. 247, Art. no. 111141, 2026, doi: 10.1016/j.epsr.2026.111141.

[80] Konyrova, M., Chezhimbayeva, K., Razaque, A., Hassan, D.S.M., 2026. Blockchain-Enabled Smart Contract Architecture for Optimal Energy Routing in Smart Grids Using Graph-Theoretic Loss Minimization. IEEE Access 14, 5340–5358. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3649401

[81] N. A. Naser, M. A. Hannan, and A. Mohamed, “Efficient Energy Routing in Smart Grid Networks Using Fractional Knapsack and Dijkstra Algorithm,” in Proceedings of the International Conference on Data Analytics for Smart Applications (DASA), 2023.

[82] H. Ishfaq, S. Kanwal, S. Anwar, M. O. Abdussalam, and W. Amin, "Enhancing Smart Grid Security and Efficiency: AI, Energy Routing, and T&D Innovations (A Review)," Energies, vol. 18, no. 17, 2025, Art. no. 4747. doi: 10.3390/EN18174747.

[83] O. Van Cutsem, D. Ho Dac, P. Boudou and M. Kayal, «Cooperative energy management of a community of smart-buildings: A Blockchain approach», International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 117, May 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.105643.

[84] M. Secchi, G. Barchi, D. Macii, and D. Petri, «Smart electric vehicles charging with centralised vehicle-to-grid capability for net-load variance minimisation under increasing EV and PV penetration levels», Sustainable Energy, Grids and Networks, vol. 35, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.segan.2023.101120.

[85] J. Rosa-Bilbao, J. Boubeta-Puig, J. Lagares-Galán and M. Vella, «Leveraging complex event processing for monitoring and automatically detecting anomalies in Ethereum-based blockchain networks», 2024.

[86] M. Meshkani, B. Farooq, «Centralized and decentralized algorithms for two-to-one matching problem in ridehailing systems», *EURO Journal on Transportation and Logistics*, vol. 12, 2023, doi: 10.1016/j.ejtl.2023.100106.

[87] A. Raza, L. Jingzhao, M. Adnan and M. S. Iqbal, «Transforming smart homes via P2P energy trading using robust forecasting and scheduling framework», Results in Engineering, vol. 23, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.102766.

[88] Y. He et al., «A verifiable EVM-based cross-language smart contract implementation scheme for matrix calculation», Digital Communications and Networks, 2024, doi: 10.1016/j.dcan.2024.03.003.

[89] M. Pashaei, H. Rastegar, S. Farhad Zandrazavi, K. Kauhaniemi, and H. Laaksonen, «Real-time hardware-in-the-loop approach for adaptive centralized protection schemes using clustering algorithms», Expert Syst Appl, p. 124707, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.eswa.2024.124707.

[91] M. Haider Sayma, M. R. Hasan, M. Khatun, A. Rajee and A. Begum, «Detecting the provenance of price hike in agri-food supply chain using private Ethereum blockchain network», Heliyon, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e30972.

[92] S. Noor, W. Yang, M. Guo, K. H. van Dam and X. Wang, «Energy Demand Side Management within micro-grid networks enhanced by blockchain», Applied Energy, vol. 228, pp. 1385–1398, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.07.012.

[93] M. A. Ferrag and L. Maglaras, «DeepCoin: A Novel Deep Learning and Blockchain-Based Energy Exchange Framework for Smart Grids», IEEE Transactions on Engineering Management, vol. 67, no. 4, pp. 1285–1297, Nov. 2020, doi: 10.1109/TEM.2019.2922936.

[94] N. F. Samreen and M. H. Alalfi, «An empirical study on the complexity, security and maintainability of Ethereum-based decentralized applications (DApps)», Blockchain: Research and Applications, vol. 4, no. 2, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.bcra.2022.100120

[95] R. Xie and M. Tang, «A digital resource copyright protection scheme based on blockchain cross-chain technology», Heliyon, vol. 10, no. 17, Sep. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e36830.
[96] F. Román-García, J. Hernández-Serrano and O. Esparza, «DA2Wa: A secure pairing protocol between a DApp and a wallet for the blockchain scenario», Computer Communications, vol. 224, pp. 1–15, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.comcom.2024.05.019.
[97] Y. Amanbek, A. Kalakova, S. Zhakiyeva, K. Kayisli, N. Zhakiyev, and D. Friedrich, «Distribution Locational Marginal Price Based Transactive Energy Management in Distribution Systems with Smart Prosumers – A Multi-Agent Approach», Energies, vol. 15, no. 7, Apr. 2022, doi: 10.3390/en15072404.
[98] A. D. Manchalwar, N. R. Patne, C. D. Morey, S. Pemmada, «Prosumers and retailers based decentralized energy trading model in the Smart Grid considering network constraints», *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 160, 2024, doi: 10.1016/j.ijepes.2024.110108.
[99] C. Yu, C. Yang, Z. Che, and L. Zhu, «Robust clustering of Ethereum transactions using time leakage from fixed nodes», Blockchain: Research and Applications, vol. 4, no. 1, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.bcra.2022.100112.
[100] G. Prinsloo, A. Mammoli, R. Dobson, «Customer domain supply and load coordination: A case for smart villages and transactive control in rural off-grid microgrids», *Energy*, vol. 135, pp. 430–441, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.06.106.
[101] В. Спиркина, «Разработка модели и методики применения систем распределенного реестра и оценки их влияния на сетевые характеристики», диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, 2022, https://www.sut.ru/doci/nauka/1AEA/DS_Spirkina/Spirkina_AV_diss.pdf.
[102] T. Chafiq, R. Azmi, A. Fadil, and O. Mohammed, «Investigating the Potential of Blockchain Technology for Geospatial Data Sharing: Opportunities, Challenges, and Solutions», Geomatica, 2024, doi: 10.1016/j.geomat.2024.100026.
[103] T. D. Hutty, S. Brown, «P2P trading of heat and power via a continuous double auction», *Applied Energy*, vol. 369, 2024, doi: 10.1016/j.apenergy.2024.123556.
[104] H. Seoudy, A. Seoudy and A. Fahmy, «Comparative analysis of centralized and decentralized control systems for NUWEIBA SWRO desalination plant», Results in Engineering, vol. 21, 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.101904.
[105] A. Boumaiza, «A blockchain-centric P2P trading framework incorporating carbon and energy trades», Energy Strategy Reviews, vol. 54, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.esr.2024.101466.
[106] Smart Grid Network Control Model Based on Blockchain 2022 International Conference CIEES 2022 - Proceedings, 2022 , Konyrova, M.,Kumyzbayeva, S., Iliev, T.B., Kadylbekkyzy, E.
[107] EFFECIENCY ASSESSMENT OF IOT DEVICES CONTROL WITH TELETRAFFIC THEORY Eastern-European Journal of Enterprise Technologies,

2023, 3(9(123)), страницы 49–59., Процентиль 46%, Konyrova, M., Kumyzbayeva, S., Iliev, T., Chezhimbayeva, K. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.281287
[108] Chezhimbayeva, K., Konyrova, M., Kumyzbayeva, S., Kadylbekkyzy, E. (2021). Quality assessment of the contact center while implementation the IP IVR system by using teletraffic theory. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(3), 64–71. doi: 10.15587/1729-4061.2021.244976
[109] R. D. Zimmerman and C. E. Murillo-Sánchez, «MATPOWER User's Manual Version 7.1», 2020.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Код Смарт контракта

```
// SPDX-License-Identifier: MIT
pragma solidity ^0.8.0;

contract EnergyTransfer {

    struct Transfer {
        address generator;
        address consumer;
        uint256 energyGenerated; // в МВт
        uint256 energyReceived; // в МВт
        uint256 cost; // в центах
    }

    Transfer[] public transfers;

    event TransferLogged(
        address indexed generator,
        address indexed consumer,
        uint256 energyGenerated,
        uint256 energyReceived,
        uint256 cost
    );

    event EtherSent(
        address indexed from,
        address indexed to,
        uint256 value
    );

    function logEnergyTransfer(
        address _generator,
        address _consumer,
        uint256 _energyGenerated,
        uint256 _lossCoefficient,
        uint256 _costInEther,
        uint256 _pricePerMwh
    ) public payable {
        require(_energyGenerated > 0, "Energy generated must be greater than zero");
        require(_lossCoefficient >= 0 && _lossCoefficient <= 100, "Loss coefficient must be between 0 and 100");

        uint256 energyLoss = (_lossCoefficient) / 100;
        uint256 energyReceived = _energyGenerated - energyLoss;
        uint256 cost = (energyReceived * _pricePerMwh);

        require(msg.value >= _costInEther, "Insufficient Ether sent");

        Transfer memory newTransfer = Transfer({
            generator: _generator,
            consumer: _consumer,
```

```
        energyGenerated: _energyGenerated,
        energyReceived: energyReceived,
        cost: cost
    });

    transfers.push(newTransfer);

    emit TransferLogged(_generator, _consumer, _energyGenerated, energyReceived, cost);

    sendEther(_consumer, _generator, _costInEther);
}

function getTransferCount() public view returns (uint256) {
    return transfers.length;
}

function getTransfer(uint256 _index) public view returns (
    address generator,
    address consumer,
    uint256 energyGenerated,
    uint256 energyReceived,
    uint256 cost
) {
    require(_index < transfers.length, "Invalid index");
    Transfer memory transfer = transfers[_index];
    return (
        transfer.generator,
        transfer.consumer,
        transfer.energyGenerated,
        transfer.energyReceived,
        transfer.cost
    );
}

function getTransfersByAddress(address _address) public view returns (Transfer[] memory) {
    uint256 count = 0;
    for (uint256 i = 0; i < transfers.length; i++) {
        if (transfers[i].generator == _address || transfers[i].consumer == _address) {
            count++;
        }
    }

    Transfer[] memory result = new Transfer[](count);
    uint256 j = 0;
    for (uint256 i = 0; i < transfers.length; i++) {
        if (transfers[i].generator == _address || transfers[i].consumer == _address) {
            result[j] = transfers[i];
            j++;
        }
    }

    return result;
}
```

```
    function sendEther(address _consumer, address _generator, uint256 costInEther) internal returns (bool success) {
        require(address(this).balance >= costInEther, "Insufficient contract balance");

        payable(_generator).transfer(costInEther);

        emit EtherSent(_consumer, _generator, costInEther);
        return true;
    }

    receive() external payable {}
}
```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ

РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

АВТОРЛЫҚ ҚҰҚЫҚПЕН ҚОРҒАЛАТЫН ОБЪЕКТІЛЕРГЕ ҚҰҚЫҚТАРДЫҢ МЕМЛЕКЕТТІК ТІЗІЛІМГЕ МӘЛІМЕТТЕРДІ ЕНГІЗУ ТУРАЛЫ

КУӘЛІК

2024 жылғы «4» қазан № 50222

Автордың (авторлардың) жөні, аты, әкесінің аты (егер ол жеке басын куәландыратын құжатта көрсетілсе): **КОНЫРОВА МАЛИНА ЖАНАТОВНА, Кумызбаева Сауле Касымбековна, Чежимбаева Катипа Сламбаевна**

Авторлық құқық объектісі: **ЭЕМ-ге арналған бағдарлама**

Объектінің атауы: **Интеграция технологии блокчейн в интеллектуальные энергосистемы**

Объектіні жасаған күні: **12.07.2024**

Құжат түпнұсқалығын http://www.kazpatent.kz/ru сайтының "Авторлық құқық" бөлімінде тексеруге болады https://copyright.kazpatent.kz

Подлинность документа возможно проверить на сайте kazpatent.kz в разделе «Авторское право» https://copyright.kazpatent.kz

ЭЦҚ қол қойылды

С. Ахметов