

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

На правах рукописи

ПАВЛОВ Николай Владимирович

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ БАЛАНСА МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
СЕТИ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ С
ОБЪЕКТАМИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ,
ИСПОЛЬЗУЮЩИМИ ПОПУТНЫЙ НЕФТЯНОЙ ГАЗ**

Специальность 2.4.2 – «Электротехнические комплексы и системы»

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – д-р техн. наук, доцент Петроченков А. Б.

Пермь – 2023

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ С ОБЪЕКТАМИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ.....	13
1.1 Современные подходы к анализу структуры электротехнических комплексов с объектами распределенной генерации	13
1.2 Структура мультиагентной модели электротехническим комплексом нефтегазодобывающего предприятия с объектами распределенной генерации	19
1.2.1 Состав электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия с объектами распределенной генерации	19
1.2.2 Структуры мультиагентных моделей электротехнических комплексов.....	22
Выводы по главе 1	24
2 РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АГЕНТОВ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ С ОБЪЕКТАМИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ.....	25
2.1 Характеристические признаки агентов мультиагентной модели	25
2.2 Функции агентов мультиагентной модели	28
2.3 Представление элементов ЭТК в мультиагентной модели	34
2.3.1 Объекты системы электроснабжения	34
2.3.2 Объекты потребления.....	35
2.3.3 Объекты генерации	37

2.4 Моделирование функции агента генерации, отражающей процесс подбора оборудования для объектов распределенной генерации	41
Выводы по главе 2	45
3 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БАЛАНСА МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ.....	46
3.1 Исходные положения	46
3.2 Анализ баланса мощности в мультиагентной модели	47
3.3 Алгоритм обеспечения баланса мощности	55
3.4 Методика построения пространства возможных электрических режимов и расчет сценариев перехода между ними	57
Выводы по главе 3	70
4 РАЗРАБОТКА МУЛЬТИАГЕНТНОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ С ОБЪЕКТАМИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ.....	71
4.1 Разработка программного обеспечения для моделирования структуры и принципов взаимодействия агентов мультиагентной модели	71
4.1.1 Описание элементов ЭТК НГДП с объектами РГ в рамках мультиагентного подхода.....	72
4.1.2 Описание агентов мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ в среде <i>LabView</i>	78
4.1.3 Описание структуры мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ в среде <i>LabView</i>	83
4.2 Физическое моделирование ЭТК НГДП с объектами РГ на лабораторных стендах	92

4.3 Анализ возможности внедрения объектов распределенной генерации на месторождениях нефти и газа Пермского края	117
Выводы по главе 4	119
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	120
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	121
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	122
Приложение А. Библиотека объектов технологического процесса добычи нефти и газа.....	136
Приложение Б. Библиотека объектов системы электроснабжения	139
Приложение В. Сведения о погрешностях измерений оборудования, используемого на лабораторных стендах	149
Приложение Г. Систематизированные данные на основе анализа возможности внедрения объектов распределенной генерации на месторождениях Пермского края	154
Приложение Д. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.....	165
Приложение Е. Акты внедрения результатов диссертационного исследования.....	166

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Важной задачей государственной политики в области энергетики при добыче полезных ископаемых является минимизация объемов сжигания попутного нефтяного газа (ПНГ) на факелах. Наиболее подходящим способом утилизации ПНГ на отраслевых предприятиях считается применение генерирующих установок. При этом к особенностям большинства электротехнических комплексов (ЭТК) нефтегазодобывающих предприятий (НГДП), ведущих разработку современных месторождений, следует отнести распределенную структуру и территориальную отдаленность ЭТК от централизованных систем электроснабжения.

В настоящий момент в электроэнергетической отрасли развивается концепция малой и средней распределенной генерации. Тем не менее, существующие централизованные системы управления электрическими сетями не в должной мере учитывают появление в сети множества таких активных объектов (объектов распределенной генерации малой и средней мощности). «Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года» относит к вызовам электроэнергетической отрасли: повышение уровня автоматизации технологических процессов; повышение надежности электроэнергетических объектов; усложнение систем и алгоритмов управления этими объектами и процессами. Необходимо также учитывать ключевые (для системы электроснабжения) особенности обеспечения баланса мощности и качества электрической энергии в децентрализованной электрической сети НГДП при различных режимах работы объектов распределенной генерации (РГ).

Методами, применение которых может повлечь за собой организационные и технологические изменения в функционировании электротехнических комплексов нефтегазодобывающих предприятий и способствовать переходу НГДП на новый технологический базис, являются сетевые технологии. Востребованным видится использование известного в

теории систем, математического моделирования и программной инженерии мультиагентного подхода, основанного на децентрализованных методах обработки информации и принятии решений. Мультиагентные модели позволяют учесть необходимое количество потоков данных, а также обладают необходимой гибкостью в случае модернизации объекта исследования.

Разработка мультиагентной модели ЭТК НГДП для обеспечения баланса мощности в электрической сети нефтегазодобывающего предприятия с объектами распределенной генерации является актуальной научной задачей в развитии общей теории электротехнических комплексов и систем и изучении их системных свойств и связей.

Целью работы является разработка мультиагентной модели электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия для обеспечения баланса мощности в электрической сети нефтегазодобывающего предприятия с учетом увеличения приходной части баланса при внедрении генерирующих установок малой и средней мощности, использующих попутный нефтяной газ.

Для достижения сформулированной цели были поставлены и решены следующие **научные задачи**:

1) разработать структуру мультиагентной модели электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия, учитывающей в своем составе агентов потребления и агентов генерации, использующих в качестве наблюдаемых параметров дебит нефтегазовой смеси и расход добываемого попутного нефтяного газа;

2) разработать принципы взаимодействия агентов мультиагентной модели электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия, учитывающие зависимости процессов генерации и потребления электрической энергии от технологического процесса добычи нефти и газа;

3) разработать методику обеспечения баланса мощности в электрической сети нефтегазодобывающего предприятия, учитывающую

баланс топлива при генерации электроэнергии в различных сценариях электрических режимов ЭТК НГДП;

4) разработать и верифицировать цифровую модель электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия с генерирующими установками малой и средней мощности.

Объектом исследования является децентрализованный электротехнический комплекс нефтегазодобывающего предприятия с объектами распределенной генерации.

Предметом исследования являются процессы генерации и потребления электрической энергии элементами электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия, имеющего в своем составе газотурбинные установки малой и средней мощности.

Идея работы заключается в применении мультиагентного подхода для описания структуры и принципов взаимодействия элементов электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия с объектами распределенной генерации.

Степень разработанности темы исследования. Моделированию электрических режимов ЭТК, в том числе и с объектами распределенной генерации, посвящены работы Г. И. Бабокина, В. А. Ведерникова, В. А. Веникова, Г. В. Веникова, Ю. Е. Гуревича, В. З. Ковалева, Ю. З. Ковалева, А. В. Ляхомского, Л. А. Плащанского, М. И. Хакимьянова, Ю. В. Шевырёва, A. Abur, D. Bunn, S. Iwamoto, K. Horigrae, A. Kwasinsky, M. Raesand, M. Paolone и др.

Подходы к моделированию различных технологических процессов, основанные на применении мультиагентных моделей, рассматриваются в работах В. Н. Буркова, И. А. Каляева, П. Ю. Новикова, А. Л. Фрадкова, А. Н. Швецова, О. Н. Граничина, В. А. Виттиха, M. Pinedo и др.

Научные подходы к оценке баланса мощности в энергосистемах рассмотрены в работах И. И. Надтоки, Н. И. Воропая, Н. А. Беляева,

А. В. Седова, Г. М. Каялова, С. В. Усатикова, С. К. Гурского, А. З. Гамма, В. И. Доброжанова, Б. И. Макоклюева, Н. В. Коровкина, Е. Д. Фармера и др.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1) структура мультиагентной модели электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия с объектами распределенной генерации, *отличающаяся от существующих* тем, что учитывает характеристические признаки агентов, связанные с балансом мощности и балансом топлива;

2) принципы взаимодействия агентов мультиагентной модели электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия с объектами распределенной генерации, *отличающиеся от существующих* тем, что учитывают специфику генерирующих установок малой и средней мощности, работающих на ПНГ, в сценариях электрических режимов ЭТК НГДП;

3) методика обеспечения баланса мощности в электрической сети нефтегазодобывающего предприятия, *отличающаяся от существующих* тем, что учитывает использование добываемого попутного нефтяного газа для генерации электроэнергии и позволяет корректировать электрические режимы электротехнического комплекса НГДП;

4) цифровая мультиагентная модель электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия с объектами распределенной генерации, *отличающаяся от существующих* тем, что учитывает параметры ПНГ различных месторождений в сценариях электрических режимов ЭТК НГДП.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается: в разработке структуры мультиагентной модели электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия с объектами распределенной генерации, учитывающей в качестве ключевых наблюдаемых параметров дебит нефтегазовой смеси и расход добываемого попутного нефтяного газа; в разработке математического и алгоритмического обеспечения взаимодействия агентов мультиагентной модели электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия с учетом зависимости

процессов генерации и потребления электрической энергии от технологического процесса добычи нефти и газа; в разработке цифровой мультиагентной модели электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия с генерирующими установками малой и средней мощности, учитывающей параметры ПНГ месторождений в различных сценариях электрических режимов ЭТК НГДП; в разработке физической модели электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия с генерирующими установками малой мощности, позволяющей натурно оценивать баланс мощности в электрической сети на лабораторном стенде.

Методика обеспечения баланса мощности в электрической сети НГДП на основе мультиагентного подхода используется при разработке интеллектуальных станций управления нефтегазовыми скважинами в НИОКТР по соглашению № 075-11-2021-052 от 24.06.2021 г. «Создание высокотехнологичного производства автономных энергосберегающих цифровых систем распределенного управления добывающим фондом скважин на основе элементов машинного обучения и искусственного интеллекта» в рамках Постановления №218 Правительства РФ от 09.04.2010 г. Разработанная цифровая мультиагентная модель ЭТК НГДП с объектами РГ используется в учебном процессе электротехнического факультета ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90092 «Обеспечение надежности при оперативном управлении режимами функционирования электротехнических комплексов на месторождениях нефти и газа».

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач в работе использовались элементы теории электротехники, теории мультиагентных систем, теории оптимизации, теории подобию, а также

методы математического моделирования с использованием пакетов компьютерных программ *LabVIEW*, *RastrWin3* и *Microsoft Excel*.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

1) структура мультиагентной модели электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия с объектами распределенной генерации, отличающаяся от существующих тем, что учитывает характеристические признаки агентов, связанные с балансом мощности и балансом топлива;

2) принципы взаимодействия агентов мультиагентной модели электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия с объектами распределенной генерации, отличающиеся от существующих тем, что учитывают специфику генерирующих установок малой и средней мощности, работающих на ПНГ, в сценариях электрических режимов ЭТК НГДП;

3) методика обеспечения баланса мощности в электрической сети нефтегазодобывающего предприятия, отличающаяся от существующих тем, что учитывает использование добываемого попутного нефтяного газа для генерации электроэнергии и позволяет корректировать электрические режимы электротехнического комплекса НГДП;

4) цифровая мультиагентная модель электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия с объектами распределенной генерации, отличающаяся от существующих тем, что учитывает параметры ПНГ различных месторождений в сценариях электрических режимов ЭТК НГДП.

Соответствие диссертации специальности 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы».

Рассматриваемые в работе задачи соответствуют паспорту специальности 2.4.2 «Электротехнические комплексы и системы» – п. 1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов

и систем, включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования»; п. 3 «Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления.»; п. 4 «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях».

Достоверность результатов подтверждается корректным использованием апробированного математического аппарата теории электротехники, теории мультиагентных систем, теории оптимизации, теории подобия; сопоставлением результатов расчетов с данными, приведенными в технической литературе, и данными, полученными в результате инструментальных замеров на физических моделях. Основные положения диссертации были опубликованы в печати, в том числе в изданиях, рекомендованных ВАК и входящих в системы цитирования *SCOPUS* и *Web of Science*.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались на следующих конференциях: XXVIII – XXXI международных научных симпозиумах «НЕДЕЛЯ ГОРНЯКА» (НИТУ МИСИС, г. Москва, 2020 – 2023 гг.); конференциях молодых исследователей России по электротехнике и электронике *IEEE* (2020 *ElConRus* и 2021 *ElConRus*) (ЛЭТИ, г. Санкт-Петербург, 2020, 2021 гг.); XI и XII международных конференциях «Инновационная энергетика» (ПНИПУ, г. Пермь, 2020, 2021 гг.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 6 работ (из них 5 работ опубликованы в изданиях, входящих в международные системы цитирования *SCOPUS* и *Web of Science*), 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора состоит в анализе существующего программно-аппаратного обеспечения, используемого для моделирования и расчета электротехнических комплексов нефтегазодобывающих предприятий с объектами распределенной генерации; разработке структуры мультиагентной модели электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия; разработке принципов взаимодействия агентов мультиагентной модели; разработке методики обеспечения баланса мощности в электрической сети нефтегазодобывающего предприятия; разработке цифровой мультиагентной модели электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия с объектами распределенной генерации и верификация её, путем проведения экспериментальных исследований на физической модели. В работах в соавторстве личный вклад соискателя составляет не менее 75%.

1 АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ С ОБЪЕКТАМИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

1.1 Современные подходы к анализу структуры электротехнических комплексов с объектами распределенной генерации

Любой элемент ЭТК нефтегазодобывающего предприятия соотносится с технологическим режимом работы соответствующего объекта, так как каждый технологический процесс определяет требования к параметрам электропотребления.

Зачастую установка систем мониторинга экономически невыгодна, а иногда технически невозможна, в зависимости от специфики и условий работы оборудования. В таких случаях проблему мониторинга потребления энергоресурсов можно решить, используя математическое моделирование [1].

Объектом исследования в данной области является электротехнический комплекс, который, в свою очередь, является подсистемой электротехнологической системы и выполняет в ней основную технологическую роль [2]. В соответствии со стандартами Международной электротехнической комиссии (МЭК), под электротехническим комплексом понимается объект, состоящий из:

- преобразовательного устройства;
- электротехнологического преобразователя;
- передаточного устройства;
- устройства управления и регулирования;
- рабочей машины, предназначенной для реализации рабочих процессов в заданном технологическом процессе.

В работах [3, 4] рассмотрен научно обоснованный подход к решению проблемы преобразования ЕЭС России в электроэнергетическую систему с активно-адаптивной сетью, особое внимание уделено применению новых технологий в силовых, алгоритмических и информационных системах,

разрабатываемых для электроэнергетики.

В работе [5] для обеспечения надежности резервирования питания предлагается использовать распределенное автоматическое включение резервного питания.

В работе [6] предложен способ распределения электрической энергии по гексагональной топологии, в рамках данного способа определяется класс напряжения и режим заземления нейтрали для сети. Также проведены модельные эксперименты аварийных режимов, по результатам которых предлагается тип релейной защиты сети.

В работах [7, 8] представлена система для оценки устойчивости электрических сетей с точки зрения распределения электроэнергии. Система также обеспечивает оценку степени функциональной зависимости нагрузок на электрические сети и показывает, как концепции устойчивости и функциональной зависимости взаимодействуют между собой. Также в работах обсуждаются последствия человеческого фактора при рассмотрении процессов в электрических сетях. Обсуждение подкреплено примерами и эмпирическими данными по оценке ущерба после аварийных событий.

В работах [9, 10] рассматривается негативное влияние объектов распределенной генерации на регуляторы напряжения электрических сетей и, следовательно, на профиль напряжения распределительных фидеров. Эти отрицательные воздействия были выявлены путем моделирования различных сценариев изменения графиков нагрузки. Объекты распределенной генерации неизбежно должны взаимодействовать и обмениваться данными с устройствами контроля напряжения распределительной сети. Интеллектуальная сеть обычно направлена на объединение существующих электрических сетей с новыми цифровыми технологиями для существенного повышения общей эффективности сети. В качестве решения проблем регулирования напряжения в распределительных сетях с большим количеством распределенной генерации была предложена мультиагентная модель управления. В работах [11, 12] также рассматриваются структуры

мультиагентных моделей, предназначенные для описания структуры ЭТК.

В работе [13–15] утверждается, что одноуровневая мультиагентная модель, наиболее подходящая для регулирования напряжения в распределительных электрических сетях в силу своей малозатратности и живучести.

В работах [16, 17] показано, что большинство способов управления, предложенных в литературе, основаны на предположении, что оператор или мультиагентная система имеет точную и своевременную модель топологии сети и полные данные о режимах функционирования. Однако это предположение далеко всегда выполняется в реальных системах, в работе рассматривается проблема оптимального управления напряжением в электрической сети при неопределенных, но ограниченных линейных параметрах. В частности, предполагается контролировать потоки активной и реактивной мощности, на уровне сетевых шин, и координировать их работу с трансформаторами с регулированием напряжения под нагрузкой (РПН). Для оценки преимущества предложенного метода, алгоритм тестировался с применением стандарта тестирования IEEE, с 13 и с 34 узлами.

Развитие распределенной генерации обуславливает необходимость создания качественно новой структуры ЭТК, с использованием концепций *Smart Grid* и *MicroGrid*. Сравнение концепций развития традиционных и интеллектуализированных («умных») ЭТК представлено в таблице 1.1. Концепции *Smart Grid* и *MicroGrid* подразумевают наличие у элементов ЭТК таких качеств, как возможность участия в регулировании режима для достижения собственных целей. Концепция *MicroGrid* ставит задачу перехода к мультиагентному управлению режимом, в том числе и для реконфигурации электрических сетей с объектами РГ. Архитектура распределенной энергетики, отвечающая этим требованиям — это такая децентрализованная система электроснабжения, в которой реализовано интеллектуальное распределенное управление, осуществляемое за счет энергетических транзакций между ее элементами [18].

Таблица 1.1 – Сравнение концепций развития ЭТК

Критерий оценки концепции	Функционал ЭТК	
	Традиционные ЭТК	<i>Smart Grid</i> и <i>MicroGrid</i> («умные сети» и распределенная генерация)
Тип взаимодействия элементов	Взаимодействие с четкой иерархией для обеспечения электроснабжения потребителей	Децентрализованное, многоуровневое взаимодействие для достижения различных целей
Контроль баланса мощности	Планирование режимов функционирования, как правило, отсутствие контроля в реальном времени	Достижение баланса методами автоматизированного управления с учетом распределенной генерации и аккумулирования энергии
Функции измерительных систем	Учет и архивирование для дальнейшего анализа и планирования	Учет и использование в реальном времени для оперативного управления
Особенности источников электроэнергии	Неэкологичность, невозобновляемость, необходимость расположения вдали от потребителей	Возобновляемость, возможность неравномерной выработки электроэнергии, аккумулирование и оперативное управление выработкой
Особенности хранения электроэнергии	Невозможность хранения, избыточная выработка при ненормальных, непрогнозируемых режимах	Отсутствие необходимости хранения электроэнергии, наличие гибридных системы потребитель/генерация
Тип оперативного диспетчерского управления	Централизованное диспетчерское управление с использованием актуальной информации автоматизированных систем учета	Децентрализованное оперативное управление с использованием систем управления, основанных на мультиагентном подходе

Для разработки агентов не нужно принципиально новых методов, могут быть использованы стандартные технологии создания искусственного интеллекта. В работах [19, 20] децентрализованные методы управления используются для создания правил дорожного движения беспилотных электромобилей, мобильных роботов-погрузчиков, которые могут свободно перемещаться в двухмерном пространстве. Хотя эти исследования все еще носят концептуальный характер, это открывает путь к разработке новых децентрализованных систем управления в практически любых сферах промышленности.

Современные промышленные предприятия и необходимые им электротехнические комплексы перестают быть централизованными и становятся все более распределенными, в них постоянно сокращается время от принятия решений – до проведения управляющих воздействий [21].

В таблице 1.2 приведены особенности задач ситуационного управления в реальном времени. Это относится к любым системам – в том числе и к системам электроснабжения и распределенным электрическим сетям.

Таблица 1.2 – Особенности задач ситуационного управления ресурсами в реальном времени

Задачи управления ресурсами	Примеры решения	
	Традиционные централизованные решения	Децентрализованные решения
Поток запросов, когда запросы и ресурсы не известны заранее	Централизованный пакетный процесс доставки запросов «сверху-вниз»	Непрерывный, распределенный процесс с согласованием
Обработка запросов и процесс принятия решений для каждого участника	Процесс доставки создает очередь, увеличивая разрыв между планом и реализацией	Решения носят индивидуальный характер для каждого участника, но имеют общую структуру, критерии, логику
Поиск варианта, удовлетворяющего всех участников	Комбинаторный поиск вариантов, при котором могут игнорироваться частные критерии для упрощения вычислений	Отсутствие «оптимального» решения для всех – в каждой ситуации ищется свой баланс интересов для участников
Взаимосвязанность прошлых и будущих решений в реальном времени	Длинные волновые эффекты перестройки расписаний при непрерывном согласовании	Изменение критериев создания и пересмотра расписаний под влиянием новых событий

Цели ситуационного управления, применительно к задачам энергетики:

- 1) оперативное управление функционированием ЭТК, как системой со сложной структурой и функциями;
- 2) для задач планирования выработки электроэнергии и обеспечения электроэнергией потребителей;
- 3) управлении автономными энергетическими комплексами с использованием невозобновляемых источников энергии;
- 4) для систематизации данных об авариях и анализе внешних факторов, влияющих на надежность функционирования ЭТК [22].

Такие цели управления рассматриваются на основе принципов ситуационного управления Д. А. Поспелова [23]. В данном исследовании предлагается ситуационный подход к управлению ресурсами в электротехническом комплексе с объектами распределенной генерации предприятия нефтегазодобывающей отрасли, в котором предполагается управление энергетическими ресурсами – топливом и электроэнергией.

Одним из подходов к ситуационному управлению, использующим математические модели, является теория активных систем (ТАС), в нем используется понятие активных управляемых субъектов [24]. В процессе развития методов объектно-ориентированного программирования и сетевых технологий возникает мультиагентный подход [25-32].

В настоящее время существует множество определений и классификаций агентных систем, однако в целом они согласуются с определениями В.И. Городецкого [34]: Агент – это автономная компьютерная программа, действующая в динамической среде целенаправленным образом. Главное свойство агента – автономность, наличие целей и способов их достижения в том числе при помощи управляющих воздействий на других агентов. Мультиагентной моделью электротехнического комплекса является множество агентов, взаимодействующих между собой в общей среде взаимодействия в соответствии с определенными принципами и стремящихся выполнить общую цель.

1.2 Структура мультиагентной модели электротехническим комплексом нефтегазодобывающего предприятия с объектами распределенной генерации

1.2.1 Состав электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия с объектами распределенной генерации

Анализ структуры, параметров и особенностей ЭТК НГДП выявили следующие специфические факторы:

- территориальную распределенность объектов, в системе электроснабжения месторождения около 30 территориально-распределенных комплектных трансформаторных подстанций;
- существенное влияние горно-геологических условий на технологический процесс и, следовательно, на функционирование электротехнического оборудования;
- значительный срок эксплуатации основного электрооборудования вместе с интенсивным развитием систем малой и автономной генерации (в том числе для задач утилизации попутного нефтяного газа).

Объекты технологического процесса и электротехническое оборудование связаны использованием ресурсов, обменом и распределением которых обеспечивает функционирование НГДП. Этими ресурсами являются:

- нефтегазовая смесь, (жидкость, добываемая из пласта);
- газ, (попутный нефтяной газ, ресурс, преобразующийся в электрическую энергию объектами генерации - ГТУ);
- электроэнергия (ресурс, необходимый для функционирования ЭТК, так как процесс потребления электроэнергии присущ всем элементам ЭТК).

На основе анализа состава ЭТК НГДП выполнена декомпозиция ЭТК и определена его типовая структура. В структуре ЭТК, имеющем в своем составе объекты РГ, присутствуют две взаимосвязанные и взаимодействующие подсистемы с разными задачами, при этом

обеспечивающих поддержание единого технологического процесса. Это подсистема источников распределенной генерации и подсистема объектов добычи нефти и газа – вместе они образуют децентрализованную систему.

С описанием такой системы хорошо справляется мультиагентный подход, основанный на децентрализованных методах обработки информации и принятии решений. Мультиагентная модель позволяют учесть необходимое количество потоков данных, а также обладают необходимой гибкостью в случае модернизации ЭТК.

Объекты механизированной добычи поставляют нефтегазовую смесь в систему сбора и сепарации, затем отсепарированный попутный нефтяной газ попадает в систему газоснабжения объектов генерации, объекты генерации перерабатывают топливо в электроэнергию, электроэнергия поступает в систему электроснабжения (СЭС) месторождения и распределяется для потребления всеми элементами ЭТК, в том числе и объектами механизированной добычи, которые поставляют нефтегазовую смесь в систему сбора и сепарации.

На рисунке 1.1 изображена структурная схема ЭТК НГДП с объектами РГ.

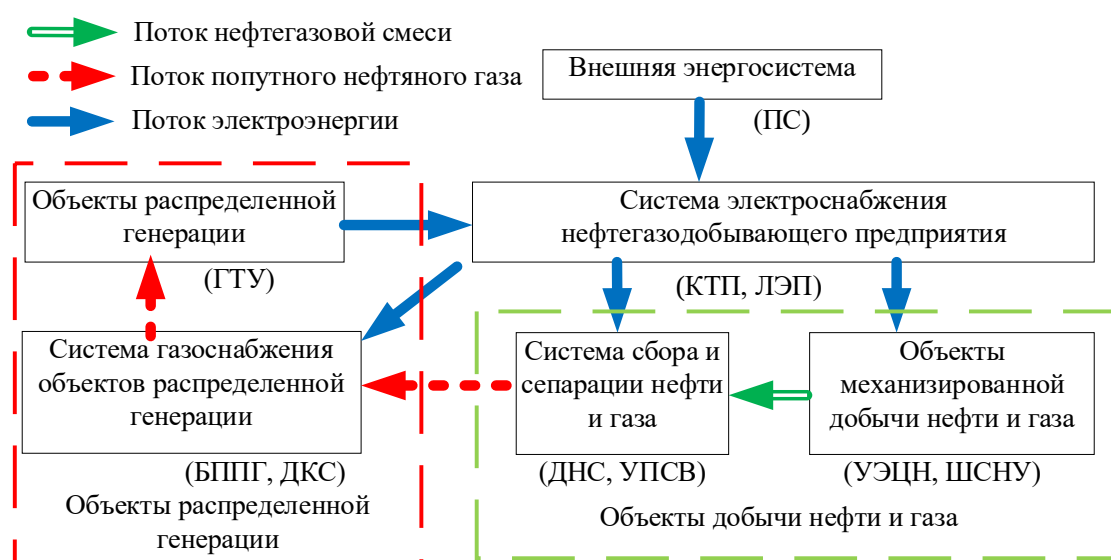


Рисунок 1.1 – Структурная схема ЭТК НГДП с объектами РГ

На схеме приняты следующие сокращения: УЭЦН – установка электроприводного центробежного насоса, ШСНУ – штанговая скважинная насосная установка, ДНС – дожимная насосная станция, УПСВ – установка предварительного сброса воды, БППГ – блочный пункт подготовки газа, ДКС – дожимная компрессорная станция, ГТУ – газотурбинная электростанция, ПС – подстанция, КТП – комплектная трансформаторная подстанция, ЛЭП – линия электропередачи.

Электротехнический комплекс НГДП с объектами РГ представлен следующими множествами объектов:

- множество объектов механизированной добычи – УЭЦН, ШСНУ потребляют электроэнергию и обеспечивают процесс добычи нефтегазовой смеси;

- множество объектов сбора и сепарации нефти и газа – ДНС, УПСВ потребляют электроэнергию и обеспечивают процесс разделения нефтегазовой смеси на нефть и попутный нефтяной газ, используемый в качестве топлива;

- множество объектов системы газоснабжения электростанции – ДКС, БППГ потребляют электроэнергию и обеспечивают процесс подготовки попутного нефтяного газа для использования его в качестве топлива для генерации электроэнергии;

- множество объектов генерации (ГТУ), которые преобразуют попутный нефтяной газ в электроэнергию, необходимую для функционирования ЭТК;

- множество объектов системы электроснабжения – КТП, ЛЭП обеспечивают процесс распределения электроэнергии по элементам ЭТК.

1.2.2 Структуры мультиагентных моделей электротехнических комплексов

Структура существующих мультиагентных моделей ЭТК НГДП с объектами РГ без учета взаимодействия двух подсистемы изображена на рисунке 1.2. Нижние индексы n и m означают количество агентов генерации и потребления, $n \in G$ – принадлежит множеству агентов генерации, $m \in H$ – принадлежит множеству агентов потребления.

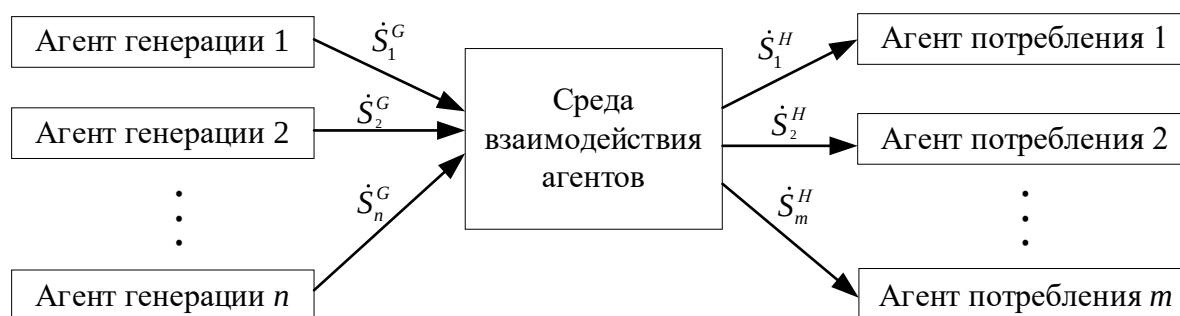


Рисунок 1.2 – Структура существующих мультиагентных моделей ЭТК НГДП с объектами РГ

Правила среды взаимодействия агентов подразумевают обеспечение баланса мощности в электрической сети:

$$\sum \dot{S}^G = \sum \dot{S}^H \quad (1)$$

где $\dot{S}^G$ – полная мощность, выдаваемая объектами генерации в электрическую сеть, кВА, $\dot{S}^H$ – полная мощность, потребляемая нагрузкой из электрической сети, кВА.

Необходимо разработать мультиагентную модель нового типа, которая будет отражать процесс взаимодействия множества агентов генерации и множества агентов потребления при помощи следующих наблюдаемых параметров:

- дебит жидкости (нефтегазовой смеси), H , м³/ч;
- расход топлива (попутного нефтяного газа), G , м³/ч;
- полная электрическая мощность (комплексная величина), $\dot{S}$, кВА.

Структура разработанной мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ изображена на рисунке 1.3.

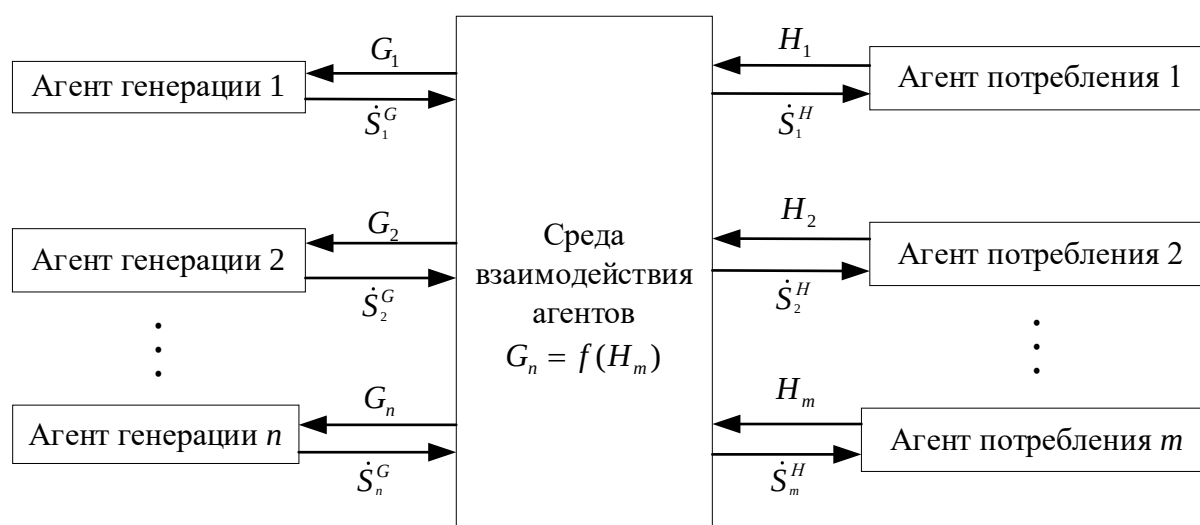


Рисунок 1.3 – Структура разрабатываемой мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ

Правила среды взаимодействия в такой мультиагентной модели подразумевает выполнение баланса мощности и баланса топлива:

$$\begin{cases} \sum \dot{S}^G = \sum \dot{S}^H \\ \sum G = \sum f(H) \end{cases} \quad (2)$$

где G – расход топлива для генерации мощности S^G , м³/ч,

H – дебит жидкости, обеспечивающийся работой объектов механизированной добычи, м³/ч,

$f(H)$ – функция, отражающая преобразование наблюдаемого параметра дебита жидкости в наблюдаемый параметр расхода топлива, то есть процесс сепарации ПНГ из нефтегазовой смеси.

При использовании структуры на рисунке 1.3 и правил среды взаимодействия (2) мультиагентная модель ЭТК НГДП с объектами РГ учитывает в качестве наблюдаемых параметров дебит нефтегазовой смеси и расход добываемого попутного нефтяного газа, связанные с балансом мощности и балансом топлива.

Выводы по главе 1

1. Анализ подходов к описанию ЭТК НГДП с объектами РГ показал, что для перехода на технологии, применение которых может повлечь за собой организационные и технологические изменения в управлении и функционировании ЭТК, необходимо использовать технологии, связанные с активно-адаптивными сетями и мультиагентными системами управления.

2. Мультиагентный подход, основанный на выборе управленческих решений с учетом сложившейся ситуации из набора допустимых управляющих воздействий, позволит рассматривать задачу обеспечения баланса мощности в электрической сети нефтегазодобывающего предприятия с объектами распределенной генерации как задачу баланса мощности и топлива.

3. При использовании разработанной структуры мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ в качестве наблюдаемых параметров учитывается дебит нефтегазовой смеси и расход добываемого попутного нефтяного газа, связанные с балансом мощности и балансом топлива.

2 РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ АГЕНТОВ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ С ОБЪЕКТАМИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

2.1 Характеристические признаки агентов мультиагентной модели

Агентно-ориентированные подходы [35, 36] применяются как к проектированию СЭС, так и для их управления. Под агентом понимаем метаобъект, способный манипулировать другими объектами, а также имеющий развитые средства взаимодействия со средой и себе подобными [37].

Мультиагентный подход представляет собой развитие известных подходов, основная идея которых состоит в том, чтобы переформулировать уравнения потока мощности [38–41].

При разработке данных принципов учитывались характеристические признаки, представленные в таблице 2.1. Множества агентов характеризуются процессами, которые проходят в соответствующих объектах ЭТК, и наблюдаемыми параметрами. Помимо множества агентов G и H выделяется множество агентов R , которому соответствуют объекты системы электроснабжения месторождения и объекты системы сбора нефти и газа.

Агенты системы электроснабжения формализуют структурные и параметрические изменения в топологии электрической сети для обеспечения баланса мощности. Агенты генерации, представленные ГТУ, работают на ПНГ, добываемом на месторождениях, также во множестве есть агент внешней энергосистемы, выдающий в сеть мощность. Минимум электрической мощности, необходимый для функционирования объектов технологического процесса, обеспечивается агентом генерации внешней энергосистемы. При избытке генерации в СЭС может использоваться дополнительная нагрузка – ближайшие населенные пункты, муниципальные учреждения, частный сектор, дачные и гаражные кооперативы.

Таблица 2.1 – Характеристические признаки множеств агентов мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ

Мно- жество	Характеристические признаки, связанные с балансом мощности		Характеристические признаки, связанные с балансом топлива	
	Процесс	Наблюдаемые параметры	Процесс	Наблюдаемые параметры
R	Передача и распределение электрической мощности	Небаланс мощности: $\Delta \dot{S} = \sum \dot{S}^G - \sum \dot{S}^H - \sum \dot{S}^R$ $\dot{S}^R$ – потери полной мощности в электрической сети, кВА	Транспортировка, сепарация и распределение нефти и газа	Небаланс топлива: $\Delta G = \sum G - \sum f(H)$ $f(H)$ – функция, отражающая процесс сепарации ПНГ
G	Выдача мощности в электрическую сеть	Генерируемая мощность, $\dot{S}^G$, кВА.	Преобразование топлива в электро-энергию	Расход топлива, G , м ³ /ч
H	Электро-потребление	Потребляемая мощность, $\dot{S}^H$, кВА.	Добыча нефтегазовой смеси	Дебит жидкости, H , м ³ /ч

Агентное моделирование – это один из методов имитационного моделирования, с его помощью исследуется поведение системы по поведению отдельных элементов системы [42–44]. Агент в данном случае – это автономная компьютерная программа, которая создает модель поведения определенного элемента системы. Мультиагентная модель подразумевает множество таких агентов, которые вынуждены согласовывать свои решения для достижения общей цели. В рамках мультиагентного подхода происходит разделение ЭТК на элементы и моделирование каждого элемента ЭТК определенным агентом, позволяющим учитывать принципы взаимодействия ограничения, представленные в среде взаимодействия и отражающие возможные режимы функционирования всей системы.

Мультиагентная модель является динамической моделью ЭТК, с помощью которой проводится оценка режимных параметров элементов ЭТК, а затем решаются задачи планирования для обеспечения надежности функционирования ЭТК [45, 46].

Динамическая модель – модель, описывающая изменения состояний объекта исследования, в которой раскрываются причинно-следственные связи, определяющие процесс перехода системы из одного состояния в другое.

Для решения задач распределения ресурсов и достижения баланса наиболее распространены циклические алгоритмы, генетические и стохастические алгоритма, на основе которых выстраиваются задачи достижения баланса, связанные с моделями сетей потребностей и возможностей [47–51].

2.2 Функции агентов мультиагентной модели

Предполагается, что невозможно создать «с нуля» полностью децентрализованную мультиагентную модель, первым шагом должно быть создание виртуальной среды взаимодействия агентов, которые используют реальные данные, собираемые с реальных объектов в одном месте, например, на сервере или в облаке. [52–55].

На рисунке 2.1 изображена структурная схема принципов взаимодействия агентов в мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ.

На схеме приняты следующие сокращения: УЭЦН – установка электроприводного центробежного насоса, ШСНУ – штанговые скважинные насосные установки, ДНС – дожимная насосная станция, УПСВ – установка предварительного сброса воды, БППГ – блочный пункт подготовки газа, ДКС – дожимная компрессорная станция, ГТУ – газотурбинная электростанция, ПС – подстанция, КТП – комплектная трансформаторная подстанция, ЛЭП – линия электропередачи.

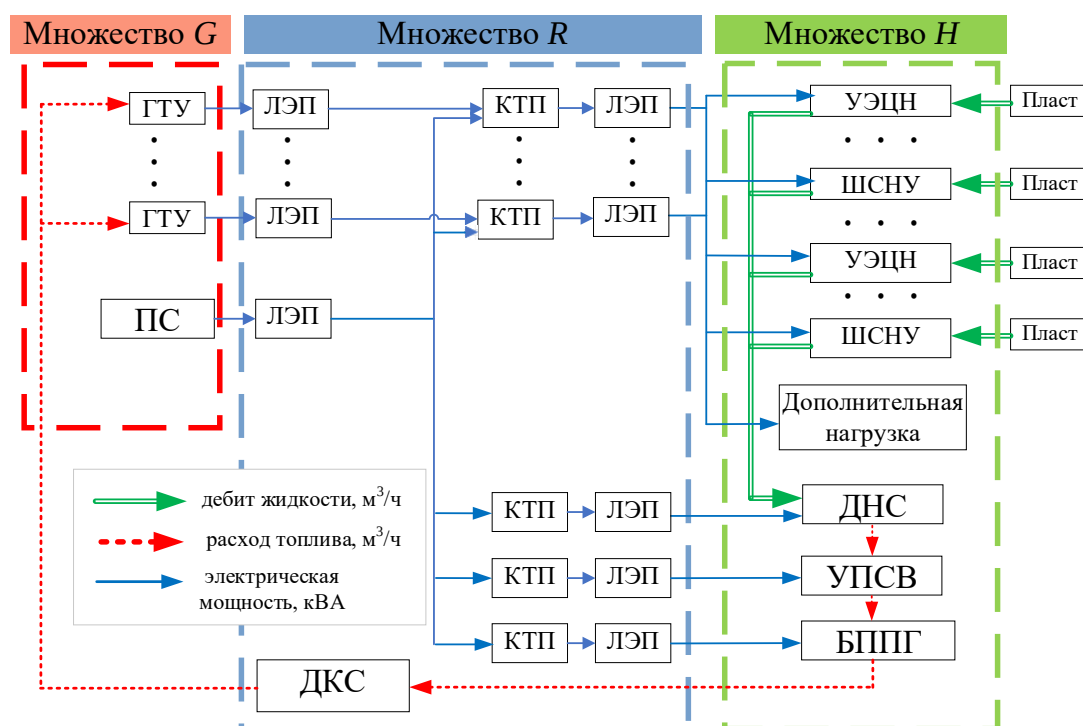


Рисунок 2.1 – Структурная схема принципов взаимодействия агентов в мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ

В таблице 2.2 представлены функции агентов мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ.

Таблица 2.2 – Функции агентов мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ

Множество агентов	Используемые потоки данных	Функция агента
$G = \{\dot{S}_0^G, \dot{S}_1^G, \dot{S}_2^G \dots \dot{S}_n^G\}$ n – количество агентов генерации	G_n – расход топлива n -ого агента, м ³ /ч; $\dot{S}_n^G$ – генерируемая мощность n -ого агента, кВА $\dot{S}_0^G$ – генерируемая мощность, без переработки топлива (внешняя энергосистема), кВА	$\dot{S}_n^G = f_n(G_n) + \dot{S}_0^G$, где $f_n(G_n)$ – функция, отражающая процесс преобразования топлива в электроэнергию, кВА
$R = \{\dot{S}_1^R, \dot{S}_2^R \dots \dot{S}_i^R, G^R\}$ i – количество объектов СЭС месторождения; G^R – баланс топлива, параметр объекта технологического процесса, отвечающего за баланс топлива (ДКС)	$\dot{S}_i^{ex}$ – мощность на выходе i -ого агента, кВА; $\dot{S}_i^{ex}$ – мощность на входе i -ого агента, кВА; $\dot{S}_i^R$ – мощности потребителей собственных нужд и (или) потери мощности в i -ом объекте СЭС месторождения, кВА; $\sum G_n$ – суммарный расход топлива, м ³ /ч; $\sum H_m$ – суммарный дебит жидкости, м ³ /ч;	$\dot{S}_i^{ex} = \dot{S}_i^{ex} - \dot{S}_i^R$ $G^R = f_R(\sum H_m) - \sum G_n - G_0$ где G_0 – поток газа, незадействованный в генерации электроэнергии, м ³ /ч; $f_R(\sum H_m)$ – функция, отражающая процесс сепарации ПНГ, м ³ /ч
$H = \{\dot{S}_0^H, \dot{S}_1^H, \dot{S}_2^H \dots \dot{S}_m^H\}$ m – количество агентов потребления	H_m – дебит жидкости m -ого агента, м ³ /ч; $\dot{S}_m^H$ – потребляемая мощность m -ого агента, кВА $\dot{S}_0^H$ – мощность, не затрачиваемая непосредственно на добычу нефтегазовой смеси, кВА	$\begin{cases} \dot{S}_m^H = f_m(H_m) + \dot{S}_0^H \\ G_m = f_R(\sum H_m) \end{cases}$ где $f_m(H_m)$ – функция, отражающая процесс электропотребления при добыче нефтегазовой смеси, кВА

Функция предполагает обработку в реальном времени наблюдаемых параметров, то есть работу с потоками данных.

Множества агентов представлены параметрами мощности, которую они способны генерировать или потреблять. Каждый агент мультиагентной модели имеет верхний индекс H, R, G , означающий принадлежность к определённому множеству агентов. Нижние индексы у агентов всех множеств означают порядковый номер агента в множестве, к которому он принадлежит, переменные i, n, t , означают количество агентов в каждом множестве.

Классификация агентов мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ внутри множеств агентов проводится по характеристическому признаку, отражающему используемые потоки данных.

Агенты генерации делятся на два типа: агент внешней энергосистемы и агенты ГТУ:

$$\sum \dot{S}_n^G = \dot{S}^{G1} + \sum \dot{S}_{n-1}^{G2} \quad (3)$$

Если агент генерации не использует поток данных о расходе топлива $f_n(G_n)=0$, значит, этот агент соответствует объекту внешней энергосистемы, его функция записывается так:

$$\dot{S}^{G1} = f_n(G_n) + \dot{S}_0^G, \text{ при } f_n(G_n) = 0 \quad (4)$$

где $\dot{S}_0^G$ – выдача мощности в сеть из внешней энергосистемы, кВА.

Функция агента генерации, соответствующего ГТУ, записывает так:

$$\dot{S}_n^{G2} = f_n(G_n) + \dot{S}_0^G, \text{ при } \dot{S}_0^G = 0 \quad (5)$$

где $f_n(G_n)$ соответствует рабочей характеристики ГТУ, индивидуальной для каждого типа ГТУ и типа используемого топлива.

Агенты потребления делятся на 3 типа: агенты добычи, агенты технологического процесса и агенты дополнительной нагрузки:

$$\sum \dot{S}_m^H = \sum \dot{S}_b^{H1} + \sum \dot{S}_t^{H2} + \sum \dot{S}_d^{H3} \quad (6)$$

где b – количество объектов добычи,

t – количество объектов технологического процесса,

d – количество объектов дополнительной нагрузки, не входящей в ЭТК НГДП.

Если агент потребления использует поток данных о дебите жидкости $f_m(H_m)$, значит этот агент соответствует объекту механизированной добычи, и его функция записывается так:

$$\begin{cases} \dot{S}_b^{H1} = f_m(H_m) + \dot{S}_0^H, & \text{при } f_R(H_m) = 0, \\ G_m = f_R(H_m) \end{cases} \quad (7)$$

В случае, если объект механизированной добычи – УЭЦН, тогда слагаемое $f_m(H_m)$ будет равно активной мощности, подводимой к насосу, необходимой для поддержания заданных технологических параметров, реактивная мощность, подводимая к насосу равно 0.

$$\dot{S}_b^{H1} = P_b^{H1} + \dot{S}_0^{H1} = \frac{\rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot \left(\frac{P_{\text{буф}}}{\rho_{\text{ж}} \cdot g} + H_{\text{ЭЦН}} \right) \cdot Q_{\text{ЭЦН}}}{\eta \cdot K_{\eta\nu} \cdot 86400} + \dot{S}_0^{H1}, \quad (8)$$

где P_b^{H1} – активная мощность потребляемая УЭЦН, кВт;

$\dot{S}_0^{H1}$ – полная мощность, не затрачиваемая непосредственно на добычу нефтегазовой смеси, кВА

$\rho_{\text{ж}}$ – плотность поднимаемой жидкости, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, принимается равным 9,81 м²/сек;

$P_{\text{буф}}$ – буферное давление, Па;

$H_{\text{ЭЦН}}$ – динамический уровень жидкости в скважине, м;

$Q_{\text{ЭЦН}}$ – заданный дебит насоса, м³/сут;

η – КПД насоса в заданной рабочей точке, о.е.;

$K_{\eta\nu}$ – коэффициент, учитывающий изменение КПД насоса при работе на вязких жидкостях, о.е.

Если агент потребления использует поток данных о расходе топлива G_m , значит этот агент соответствует объекту технологического процесса, и его функция записывается так:

$$\begin{cases} \dot{S}_t^{H2} = f_m(H_m) + \dot{S}_0^H, & \text{при } f_m(H_m) = 0 \\ G_m = f_R(H_m) \end{cases} \quad (9)$$

где $\dot{S}_0^H$ – мощность, подводимая к объекту, спроектированной на работу с определенными объемами нефтегазовой смеси, кВА, $f_R(H_m)$ – функция, отражающая процесс сепарации газа, в упрощенном виде эту зависимость можно выразить так:

$$G_m = J \cdot H_m \quad (10)$$

где J – газовый фактор, количество растворённого в нефти газа, м³/м³.

Если агент потребления не использует потоки данных о дебите жидкости и расходе топлива $H_m = 0$, $G_m = 0$, значит этот агент соответствует дополнительной нагрузке:

$$\begin{cases} \dot{S}_d^{H3} = f_m(H_m) + \dot{S}_0^H, & \text{при } f_m(H_m) = 0, f_R(H_m) = 0 \\ G_m = f_R(H_m) \end{cases} \quad (11)$$

Агенты среды взаимодействия делятся на два типа: агенты системы электроснабжения месторождения и агенты технологического процесса, отвечающие за баланс топлива. Агенты системы электроснабжения месторождения использует потоки данных о входной $\dot{S}_i^{ex}$ и выходной $\dot{S}_i^{ex}$ мощности:

$$\dot{S}_i^{ex} = \dot{S}_i^{ex} - \dot{S}_i^R \quad (12)$$

Агенты ДКС используют потоки данных о суммарном дебите жидкости $\sum f_R(H_m)$, суммарном расходе топлива $\sum G_n$, и потоке газа, незадействованного в генерации электроэнергии G_0 :

$$G^R = \sum f_R(H_m) - \sum G_n - G_0 \quad (13)$$

Потоки данных, используемые различными агентами мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ представлены в таблице 2.3. В таблице обозначено на какие потоки данных агент может влиять при помощи своих управляющих воздействий, а какие подлежат наблюдению.

Таблица 2.3 – Потоки данных, используемые агентами мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ

Агенты	Потоки данных					
	G_n	$\dot{S}_0^G$	H_m	$\dot{S}_0^H$	$\dot{S}_i^{ex}$	$\dot{S}_i^R$
$\dot{S}_n^{G1} = \dot{S}_0^G$	–	Управ.	–	–	–	–
$\dot{S}_n^{G2} = f_n(G_n)$	Управ.	–	–	–	–	–
$\dot{S}_m^{H1} = f_m(H_m) + \dot{S}_0^H$	–	–	Управ.	Наблюд.	–	–
$\begin{cases} \dot{S}_m^{H2} = \dot{S}_0^H \\ G_m = f_R(H_m) \end{cases}$	–	–	Наблюд.	Наблюд.	–	–
$\dot{S}_m^{H3} = \dot{S}_0^H$	–	–	–	Управ.	–	–
$\dot{S}_i^{ex} = \dot{S}_i^{ex} - \dot{S}_i^R$	–	–	–	–	Наблюд.	Наблюд.
$G^R = \sum G_n - \sum f_R(H_m)$	Наблюд.	–	Наблюд.	–	–	–

При использовании классификации агентов по наблюдаемым параметрам и потокам данных появляется необходимость оценивать результативность управляющих воздействий (УВ) мультиагентной модели на параметры объектов генерации и потребления в электрической сети.

Цели управления разделяются на четыре временные стадии [57, 58]:

- 1) автоматическое управление режимами;
- 2) оперативное управление режимами (корректировку при отклонении реальных условий от расчетных);
- 3) краткосрочное планирование (задачи, связаны с подготовкой режима работы в течение ближайших суток);
- 4) долгосрочное планирование (обеспечению необходимого уровня надежности электроснабжения).

В работе основное внимание уделяется долгосрочному и краткосрочному планированию. Глобальная цель управления режимами определяется основной функцией ЭТК, заключающейся в обеспечении бесперебойного электроснабжения объектов технологического процесса [59, 60].

2.3 Представление элементов ЭТК в мультиагентной модели

2.3.1 Объекты системы электроснабжения

Для моделирования работы оборудования и расчета потерь электроэнергии элементы системы электроснабжения представлены при помощи схем замещения (двухполюсников) (рисунок 2.2) [61–63].

Электрические потери в элементе КТП:

$$\dot{S}_{вых}^{КТП} = \dot{S}_{вх}^{КТП} - \Delta \dot{S}^{КТП} \quad (14)$$

$$\Delta \dot{S}^{КТП} = (\Delta P_{xx} + i\Delta Q_{xx}) + (\Delta P_H + i\Delta Q_H) \quad (15)$$

где ΔP_{xx} , $i\Delta Q_{xx}$ – паспортное значение потерь активной и реактивной мощности холостого хода трансформатора, установленного на КТП, ΔP_H , $i\Delta Q_H$ – потери в трансформаторе под нагрузкой.

Электрические потери в элементе ЛЭП:

$$\dot{S}_{вых}^{ЛЭП} = \dot{S}_{вх}^{ЛЭП} - \Delta \dot{S}^{ЛЭП} \quad (16)$$

$$\dot{S}_{вых}^{ЛЭП} = 3 \cdot I_{ЛЭП}^2 \cdot (r_{ЛЭП} + ix_{ЛЭП}) \quad (17)$$

где $r_{ЛЭП}$ – активное сопротивление линии электропередачи, Ом;

$ix_{ЛЭП}$ – реактивное сопротивление линии электропередачи, Ом;

$I_{ЛЭП}$ – ток, протекающий в линии, А.

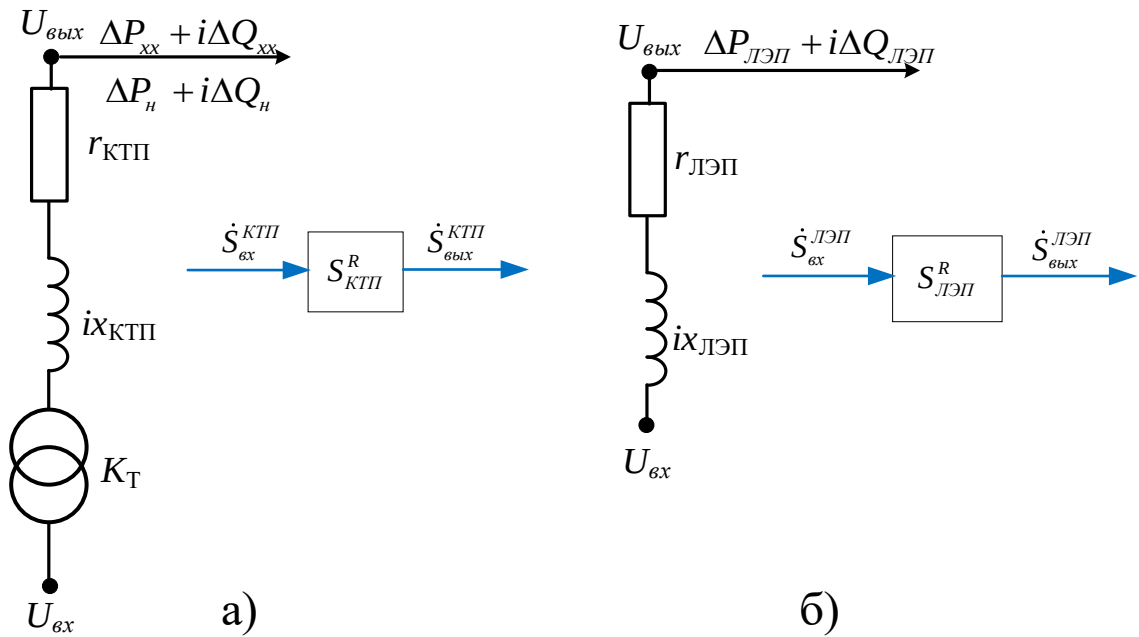


Рисунок 2.2 – Схемы замещения элементов ЭТК: а) КТП; б) ЛЭП

2.3.2 Объекты потребления

К объектам потребления относятся: объекты механизированной добычи, объекты технологического процесса (объекты сбора и сепарации нефти и газа, объекты системы газоснабжения ГТУ) и объекты дополнительной нагрузки [64, 65]. Для объектов технологического процесса и объектов дополнительной нагрузки за потребляемую активную мощность следует принимать номинальную мощность электрооборудования по паспорту. Потери в электрооборудовании рассчитываются исходя из номинального КПД:

$$\Delta P^H = N \cdot \eta \quad (18)$$

где N – номинальная мощность электрооборудования по паспорту, кВт;
 η – КПД, определяется по паспортным данным при номинальной нагрузке, о.е.

Для других объектов в случае, если отсутствуют данные о нагрузке, а имеются лишь данные о коммутационном оборудовании в ячейке КТП (номинальные токи выключателей), то расчет потребляемой активной мощности ячейки следует проводить следующим образом:

$$P^H = \sqrt{3} \cdot I_{\text{ном.выкл}} \cdot U_{\text{ном}} \cdot k_c \cdot \cos \varphi \quad (19)$$

где $I_{\text{НОМ.ВЫКЛ.}}$ – номинальный ток выключателя, А;

$U_{\text{НОМ}}$ – номинальное напряжения выключателя, кВ;

k_c – среднепромысловый коэффициент спроса, согласно [66];

$\cos\varphi$ – коэффициент мощности (для напряжения 0,4 кВ принимать равным 0,94; для напряжения 6-20 кВ принимать равным 0,93) согласно [67];

Номинальный дебит насоса на объектах механизированной добычи с использованием УЭЦН рассчитывается исходя из паспортных данных ПЭД по формуле:

$$H_m = \frac{86400 \cdot \eta_{\text{нас}} \cdot \eta_{\text{ГЗ}} \cdot N_{\text{ПЭД}}}{P_{\text{нас}}} \cdot 10^{-3} = \frac{86400 \cdot \eta_{\text{нас}} \cdot \eta_{\text{ГЗ}} \cdot N_{\text{ПЭД}}}{\rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot H_{\text{нас}}} \cdot 10^{-3} \quad (20)$$

где $P_{\text{нас}}$ – потребное давление насоса, МПа;

$N_{\text{ПЭД}}$ – паспортная мощность двигателя, кВт;

$\eta_{\text{нас}}$ – КПД насоса, определяется по паспортным данным при номинальной нагрузке, о.е;

$\eta_{\text{ГЗ}}$ – КПД передачи от двигателя до насоса (принимается равным 0,92-0,95);

$\rho_{\text{ж}}$ – плотность добываемой жидкости, кг/м³;

$H_{\text{нас}}$ – напор насоса, м.

Также к электрооборудованию УЭЦН относятся:

- погружной асинхронный электродвигатель;
- погружная кабельная линия;
- трансформатор;
- участок кабельной линии трансформатор – станция управления;
- станция управления;
- участок кабельной линии станция управления – комплектная

трансформаторная подстанция.

Расчет этих элементов аналогичен расчету объектов системы электроснабжения.

2.3.3 Объекты генерации

При моделировании ЭТК НГДП с объектами РГ необходимо учитывать модели турбин. Применяемые модели можно условно разделить на группы в зависимости от задач исследований:

- модели, которые применяются для исследования условий устойчивости электрической системы при исследовании переходных процессов после различного рода возмущений [68, 69].

- модели, учитывающие действие систем регулирования частоты и мощности, и более подробно отражают механическую и тепловую части системы, в том числе модели для проведения стендовых и натурных испытаний [70, 71].

В данной работе для моделирования переходных процессов наиболее целесообразно использовать модели первой группы, необходимо лишь качественное, функциональное отражение характеристик ГТУ, которые могут существенно повлиять на баланс мощности в электрической сети НГДП.

Модель газотурбинной установки. Величина частоты в электрической сети оказывает существенное влияние на работу оборудования и потребителей [72]. Принципиальные схемы рассматриваемых моделей приведены в технических отчетах исследовательских групп [73], обзорных статьях [74] и материалах производителей оборудования. В работе [75] приведено сравнение основных особенностей моделей газотурбинных установок, описанных в литературе. В таблице 2.4 приведена классификация моделей газотурбинных установок с учетом анализа применения для мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ.

Для моделирования газотурбинной установки в ЭТК с НГДП с объектами РГ была выбрана модель *Rowen*, так как необходима модель одновальной газотурбинной установки, но при этом не слишком сложная – не требуется учёт термодинамических процессов в газотурбинной установке для обеспечения надежности функционирования ЭТК в рамках мультиагентной

модели. А для учета взаимосвязи добычи попутного нефтяного газа и потребление электроэнергии необходимо моделирование входного направляющего аппарата, положение которого влияет на расход воздуха и расход топлива в модели газотурбинной установки.

Модель генератора. Система координат, изображенная на рисунке 2.3, соответствует системе, представленной в ГОСТ 27430-87 [76, 77].

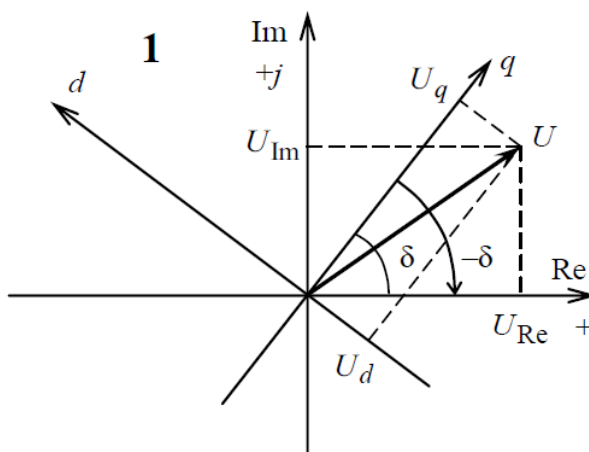


Рисунок 2.3 Система координат, где ось d опережает ось q

Уравнения движения в модели генератора реализованы в варианте:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{T_j P_{ном}} \left(\frac{P_t P_{ном}}{1+s} - \frac{P_{эл}}{1+s_u} - D \cdot P_{ном} \cdot (s - s_u) \right) \quad (21)$$

где P_t – мощность турбины, о.е., при наличии турбины/регулятора скорости значение берется из соответствующего устройства;

$P_{эл}$ – электрическая мощность, может быть переопределена (как виртуальная функция);

S – скольжение, о.е;

S_u – скольжение модуля напряжения, рассчитывается как производная от угла напряжения узла (используется реально дифференцирующее звено с постоянной времени);

D – коэффициент демпфирования;

T_j (постоянная времени), либо $M_j = T_j P_{ном}$ (момент инерции).

Таблица 2.4 Классификация моделей газотурбинных установок

	GAST	GAST2A	Rowen	IEEE	С зависимостью от частоты	CIRGE	GGOV1
Конфигурация модели	Модель одновальной ГТУ	Модель одновальной ГТУ	Модель одновальной ГТУ	Модель одновальной ГТУ	Модель одновальной ГТУ	Модель парогазовой турбины	Модель тепловой станции
Моделирование ГТУ и регуляторов	Совмещенное	Совмещенное	Совмещенное	Раздельное	Раздельное	Совмещенное	Совмещенное
Представление ГТУ	2 уравнения и звено чистого запаздывания	3 уравнения и звено чистого запаздывания	3 уравнения и звено чистого запаздывания	С учетом термодинамики	5 уравнений и звено чистого запаздывания	Передаточная функция 2 порядка	Линейная передаточная функция
Моделирование входного направляющего аппарата	Нет	Нет	Да	Да	Да	Нет	Нет
Моделирование регулятора ускорения	Нет	Да	Да	Нет	Да	Да	Да
Расчет теплоты расхода выхлопных газов	Нет	Нет	Да	Да	Да	Нет	Нет
Расчет давления на выходе из компрессора	Нет	Нет	Нет	Нет	Да	Нет	Нет
Моделирование ЭТК с РГ	Да	Да	Да	Да	Нет	Нет	Нет
Моделирование ЭТК НГДП	Нет	Нет	Да	Нет	Нет	Нет	Нет

Уравнение для переходного процесса в обмотке возбуждения:

$$T_{d0}' \frac{dE_q'}{dt} = E_{qe} - E_q' + I_d (X_d - X_d') \quad (22)$$

где X_d , X_q – сопротивления обмотки возбуждения по осям d и q ,

I_d , E_q' – ток и напряжение обмотки возбуждения по осям d и q ,

X_d' – сопротивление генератора,

T_{d0}' – постоянная времени.

Два уравнения для переходного процесса в демпферной обмотке:

$$T_{d0}'' \frac{dE_q''}{dt} = E_q' - E_q'' + I_d (X_d' - X_d'') \quad (23)$$

$$T_{d0}'' \frac{dE_q''}{dt} = -E_q'' + I_q (X_q - X_q'') \quad (24)$$

где X_d'' , X_q'' – сверхпереходные сопротивления демпферных обмоток по осям d и q , T_{d0}'' , T_{q0}'' – постоянные времени.

Расчет электрической мощности, используемой в уравнении движения, осуществляется по формуле:

$$P_{эл} = E_q'' \cdot I_q + E_d'' \cdot I_d + (X_d'' - X_q'') I_d \cdot I_q \quad (25)$$

Модель системы возбуждения. В модели используется одно апериодическое звено:

$$\frac{dE_{qe}}{dt} = \frac{1}{T_B} (-E_{qe} + E_{qe0} + \Delta E_{\Sigma}) \quad (26)$$

где T_B – постоянная времени возбудителя, E_{qe} – напряжение возбуждения, В

$$\Delta E_{\Sigma} = \Delta U_{APB} + K_I (I_g - I_{g0}) + K_{if} (E_q - E_{qe0}) + \Delta U_{форс} + \Delta U_{дон2} \quad (27)$$

где I_g – ток генератора, А; E_q – ток ротора, А; $\Delta U_{форс}$ – сигнал форсировки, В;

$\Delta U_{дон2}$ – дополнительный сигнал на вход возбудителя, В.

2.4 Моделирование функции агента генерации, отражающей процесс подбора оборудования для объектов распределенной генерации

Принято считать, что в долгосрочной перспективе на смену попутному нефтяному газу или природному газу должно прийти водородное топливо [78–81]. Метановодородное топливо имеет нестабильный состав (нет единого стандарта по процентному соотношению метана/водорода). Подобные проблемы актуальны и сейчас при использовании ПНГ, обладающего теми же свойствами – состав ПНГ может сильно различаться на разных месторождениях и на разных промежутках времени.

Известны подходы [82–84], где предлагается общая универсальная методика расчета топливной системы и камеры сгорания для адаптации газотурбинной установки к работе на непредусмотренном изначально топливе. Данная методика с адаптацией к работе с агентом генерации в рамках мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ изображена в виде алгоритмов на рисунках 2.4 и 2.5. и структурно-функциональной схемы на рисунке 2.6.

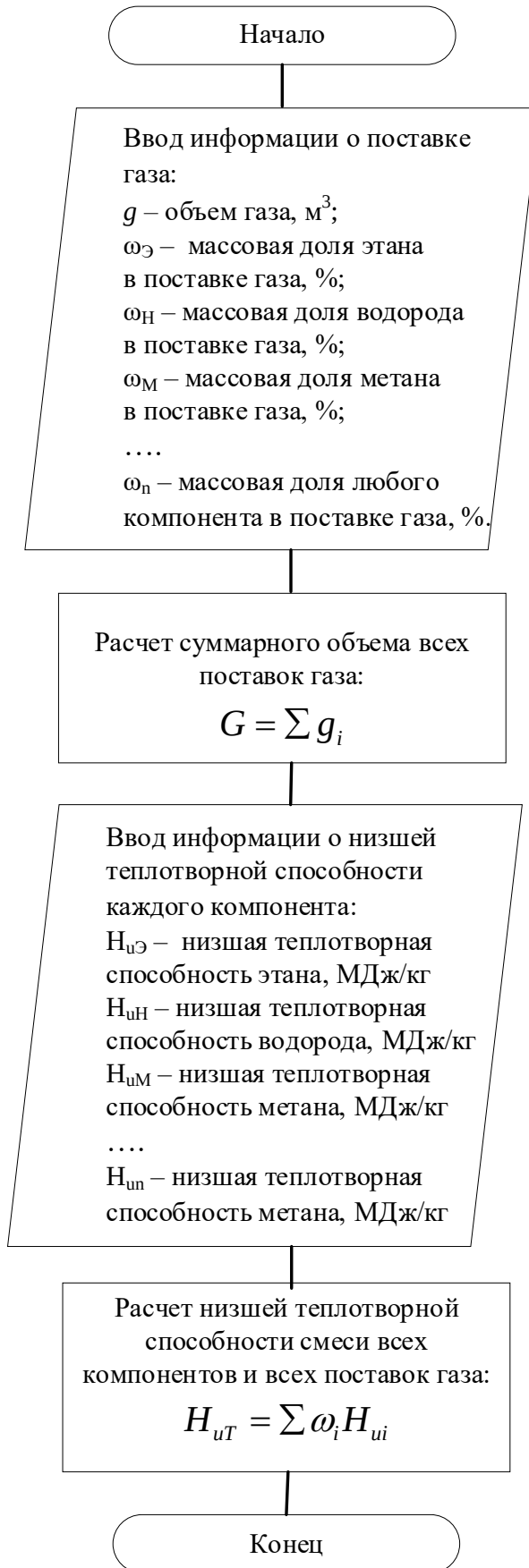


Рисунок 2.4 – Алгоритм определения теплофизических свойств газа

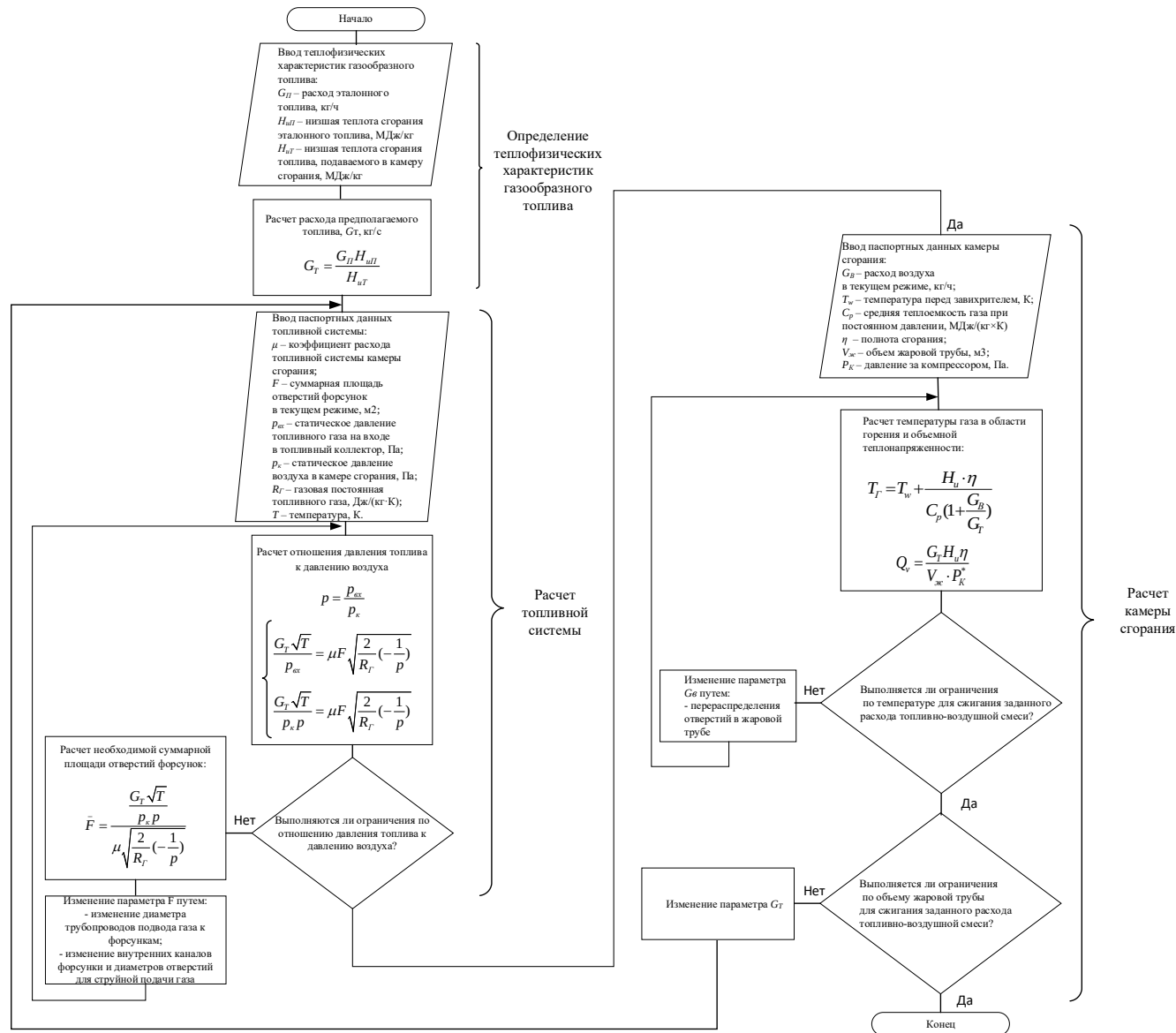


Рисунок 2.5 – Алгоритм определения параметров топливной системы и камеры сгорания

Расчет топливной системы

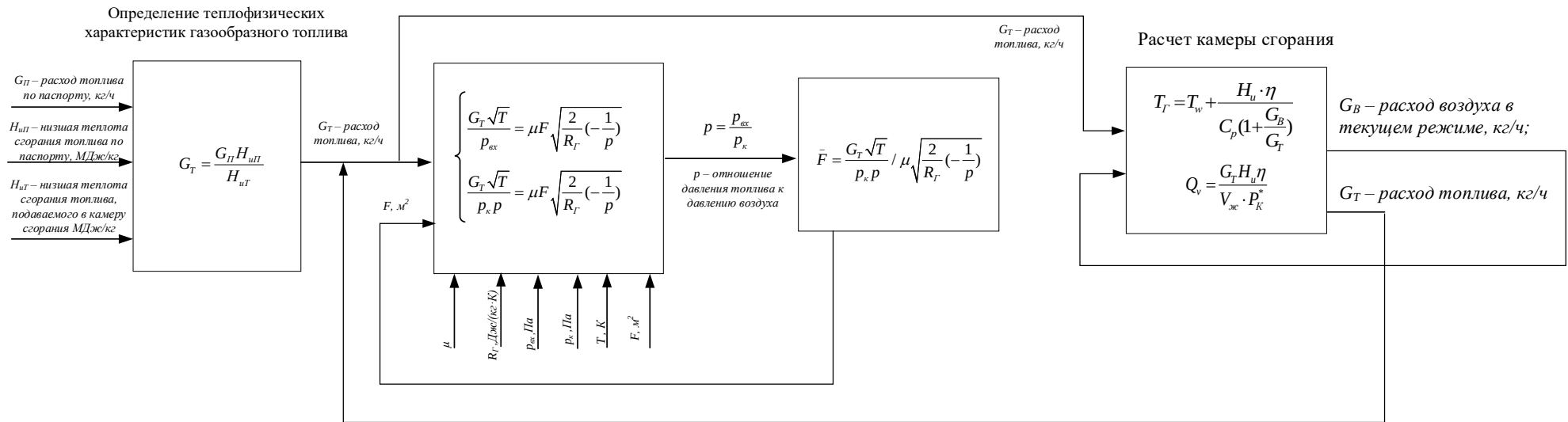


Рисунок 2.6 – Структурно-функциональная схема определения параметров агента генерации

μ – коэффициент расхода топливной системы камеры сгорания; F – суммарная площадь отверстий форсунок, м²; $p_{\text{вх}}$ – статическое давление топливного газа на входе в топливный коллектор, Па; $p_{\text{к}}$ – статическое давление воздуха в камере сгорания, Па; $R_{\text{г}}$ – газовая постоянная топливного газа, Дж/(кг·К); T – температура, К; $G_{\text{в}}$ – расход воздуха в текущем режиме, кг/ч; $T_{\text{в}}$ – температура перед завихрителем, К; C_p – средняя теплоемкость газа при постоянном давлении, МДж/(кг×К); η – полнота сгорания; $V_{\text{ж}}$ – объем жаровой трубы, м³; $P_{\text{к}}$ – давление за компрессором, Па.

Выводы по главе 2

1. Определены характеристические признаки множеств агентов разработанной мультиагентной модели электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия. Произведена классификация агентов внутри множеств по наличию потоков данных.

2. Разработаны принципы взаимодействия агентов мультиагентной модели электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия, учитывающие:

- зависимости процессов генерации и потребления электрической энергии от параметров технологического процесса добычи нефти и газа;
- специфику генерирующих установок малой и средней мощности, работающих на ПНГ, в сценариях электрических режимов ЭТК НГДП.

3. Разработаны модернизированные модели элементов и модели взаимодействия элементов мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ для расчета управляемых и наблюдаемых параметров (потоков данных) объектов электротехнического комплекса с учетом особенностей структуры мультиагентной модели.

4. Разработана функция агента генерации, отражающая процесс подбора оборудования для объектов распределенной генерации, что позволяет моделировать положение входного направляющего аппарата ГТУ (для учета расхода воздуха и расхода топлива в модели газотурбинной установки), а также учитывать состав топлива, поступающего на объекты генерации.

3 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БАЛАНСА МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ

3.1 Исходные положения

Электрические режимы в электрической сети НГДП с объектами РГ можно считать квазиустановившимся, однако параметры технологического режима влияют на возможные режимы работы объектов распределенной генерации. От объемов добычи нефтегазовой жидкости и попутного нефтяного газа зависят возможности по планированию режимов генерации.

Методы расчета установившегося режима, сводящегося к решению уравнений установившихся режимов, можно разделить на системные методы и поузловые методы [85, 86].

Анализ структуры электрической сети НГДП с объектами РГ показывает, что она относится к разомкнутой сети. Анализ источников [87–90] показывает, что при данной конфигурации системы используется следующая форма записи уравнений, определяющих взаимосвязь параметров установившегося режима электрической системы:

$$\mathbf{\dot{J}} = \mathbf{\dot{B}}\mathbf{\dot{Z}}^{-1}, \quad (28)$$

где $\mathbf{\dot{J}}$ – вектор задающих токов, $\mathbf{\dot{B}}$ – вектор напряжений, $\mathbf{\dot{Z}}^{-1} = \mathbf{\dot{Y}}$ – обратная матрица сопротивлений.

В форме баланса мощности для i -го узла уравнение (28) записывается в виде:

$$U_i^* \left(\dot{Y}_{ii} \dot{U}_i - \sum_{j \in J} \dot{Y}_{ij} \dot{U}_j \right) = S_i^*, \quad (29)$$

где J – множество узлов, инцидентных с узлом i ; i – узел начала элемента; j – узел конца элемента; «*» – символ, обозначающий комплексное сопряженное число.

3.2 Анализ баланса мощности в мультиагентной модели

Уравнение баланса мощности в электрической сети нефтегазодобывающего предприятия с объектами РГ:

$$\sum \dot{S}^G = \sum \dot{S}^H + \sum \dot{S}^R, \quad (30)$$

где $\sum \dot{S}^G$ – суммарная генерируемая мощность, кВА, $\sum \dot{S}^H$ – суммарная мощность потребителей, кВА, $\sum \dot{S}^R$ – мощность, затрачиваемая на функционирование системы электроснабжения месторождения (потери, собственные нужды и прочее), кВА.

Оценить баланс мощности можно по величине небаланса мощности:

$$\Delta \dot{S} = \sum \dot{S}^G - \sum \dot{S}^H - \sum \dot{S}^R. \quad (31)$$

Уравнение баланса мощности в рамках мультиагентной модели описывает правила взаимодействия агентов, то есть среду взаимодействия агентов. Общее уравнение среды взаимодействия агентов записывается как:

$$(\dot{S}^{G1} + \sum \dot{S}_n^{G2}) = (\sum \dot{S}_b^{H1} + \sum \dot{S}_t^{H2} + \sum \dot{S}_d^{H3} + \sum \dot{S}_i^R), \quad (32)$$

где $\dot{S}^{G1}$ – мощность, поступающая из внешней энергосистемы, кВА,

$\dot{S}_n^{G2}$ – генерируемая мощность n -ого агента генерации, кВА,

$\dot{S}_b^{H1}$ – мощность, затрачиваемая на добычу нефтегазовой смеси b -ым агентом добычи, кВА,

$\dot{S}_t^{H2}$ – мощность, затрачиваемая на обеспечении функционирования технологического процесса t -ым агентом технологического процесса, кВА

$\dot{S}_d^{H3}$ – мощность потребляемая d -ым агентом дополнительной нагрузки, кВА,

$\dot{S}_i^R$ – мощность, затрачиваемая на функционирование СЭС месторождения i -ым агентом СЭС, кВА.

Учитывая уравнение баланса топлива (13) и применение мультиагентного подхода, учитывающего использование попутного нефтяного газа для генерации электроэнергии, уравнение среды взаимодействия агентов можно записать как:

$$\dot{S}^{G1} = \sum \dot{S}_b^{H1} - \sum \dot{S}_b^{G2} + \sum \dot{S}_t^{H2} + \sum \dot{S}_d^{H3} + \sum \dot{S}_i^R \quad (33)$$

где $\dot{S}_b^{G2}$ – мощность, генерируемая за счет использования попутного нефтяного газа, добываемом b -ым агентом добычи, кВА.

Анализ источников [91-98] показывает, что в данных условиях необходимо применить следующий расчет основных параметров газотурбинной установки:

Удельная работа в компрессоре, Дж/кг:

$$H_K = C_{p.g.} \cdot T_{ex.K} \cdot (\varepsilon^{\frac{K_B-1}{K_B}} - 1) \cdot \frac{1}{\eta_K}, \quad (34)$$

где $C_{p.g.}$ – теплоемкость воздуха, $\frac{Дж}{кг \cdot K}$, $T_{ex.K}$ – температура на входе в камеру сгорания, °K, ε – степень повышения давления в компрессоре, K_B – показатель адиабаты воздуха, η_K – изэнтропный КПД компрессора.

Температура на выходе из компрессора:

$$T_{вых.K} = T_{ex.K} \cdot (\varepsilon^{\frac{K_B-1}{K_B}} - 1) \cdot \frac{1}{\eta_K}. \quad (35)$$

Давление воздуха на входе в рабочее колесо компрессора:

$$P_{ex.K} = P_0 \cdot \sigma_{ex.K}, \quad (36)$$

где P_0 – стандартное давление, Па, $\sigma_{ex.K}$ – коэффициент полноты давления в камере сгорания.

Давление на выходе из компрессора:

$$P_{вых.K} = P_{ex.K} \cdot \varepsilon. \quad (37)$$

Давление на выходе из камеры сгорания:

$$P_{вых.KC} = P_{вых.K} \cdot \sigma_{KC}, \quad (38)$$

где σ_{KC} – коэффициент полноты давления в камере сгорания.

Удельная работа расширения на свободной турбине:

$$H_{CT} = C_{p.газ} \cdot T_{ex.СТ} \cdot \left(1 - \frac{1}{\delta^{\frac{K_T-1}{K_T}}}\right) \cdot \eta_T, \quad (39)$$

где $C_{p, газ}$ – теплоемкость газа, $\frac{Дж}{кг \cdot K}$, $T_{вх.СТ}$ – температура на входе в свободную турбину, °K, δ – коэффициент потерь степени сжатия, K_T – удельная теплоемкость газа, η_T – изоэнтропный КПД турбины, о.е.

Температура на выходе из свободной турбины:

$$T_{вых.СТ} = T_{вх.СТ} - \frac{H_{СТ}}{C_{p, газ}}. \quad (40)$$

Эффективная удельная работа на выходе из ГТУ:

$$H_G = H_{СТ} \cdot \mu_{СТ} \cdot \eta_M, \quad (41)$$

где $\mu_{СТ}$ – коэффициент расхода свободной турбины, $\frac{Дж}{кг \cdot K}$, η_M – механический КПД

Коэффициент избытка воздуха в камере сгорания:

$$\alpha = \frac{1}{Km0} \cdot \frac{Hu \cdot \eta_{КС} + C_{p, газ} \cdot T_{вх.гор} + C_{p, в.} \cdot Km0}{C_{p, в.} \cdot (T_{вх.КС} - T_{выхКС})}, \quad (42)$$

где $Km0$ – стехиометрическое соотношение, Hu – низшая теплота сгорания (теплопроизводительность) топлива, Дж/кг, $\eta_{КС}$ – полнота сгорания, коэффициент расхода свободной турбины, $\frac{Дж}{кг \cdot K}$, $T_{вх.гор}$ – температура горючего на входе в камеру сгорания, °K.

Суммарный расход через газотурбинную установку, кг/с:

$$G_{pT} = \frac{N^G}{H_G}, \quad (43)$$

где N^G – электрическая активная мощность ГТУ, кВт.

Расход топливного газа, кг/с:

$$G_T = \frac{G_{pT}}{1 + \alpha \cdot Km0}. \quad (44)$$

Расход воздуха через компрессор, кг/с:

$$G_B = G_{pT} - G_T. \quad (45)$$

Активная мощность компрессора, кВт:

$$N_K = G_B \cdot H_K. \quad (46)$$

Активная мощность свободной турбины, кВт:

$$N_{CT} = G_{pT} \cdot H_{CT}. \quad (47)$$

Удельный расход воздуха, $\frac{\text{кг}}{\text{ч} \cdot \text{кВт}}$

$$B_B = \frac{G_B}{N^G} \cdot 3,6. \quad (48)$$

Удельный расход топливного газа, $\frac{\text{кг}}{\text{ч} \cdot \text{кВт}}$

$$B_T = \frac{G_T}{N^G} \cdot 3,6. \quad (49)$$

На рисунке 3.1 изображена структурная схема газотурбинной установки для использования в агенте генерации мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ.

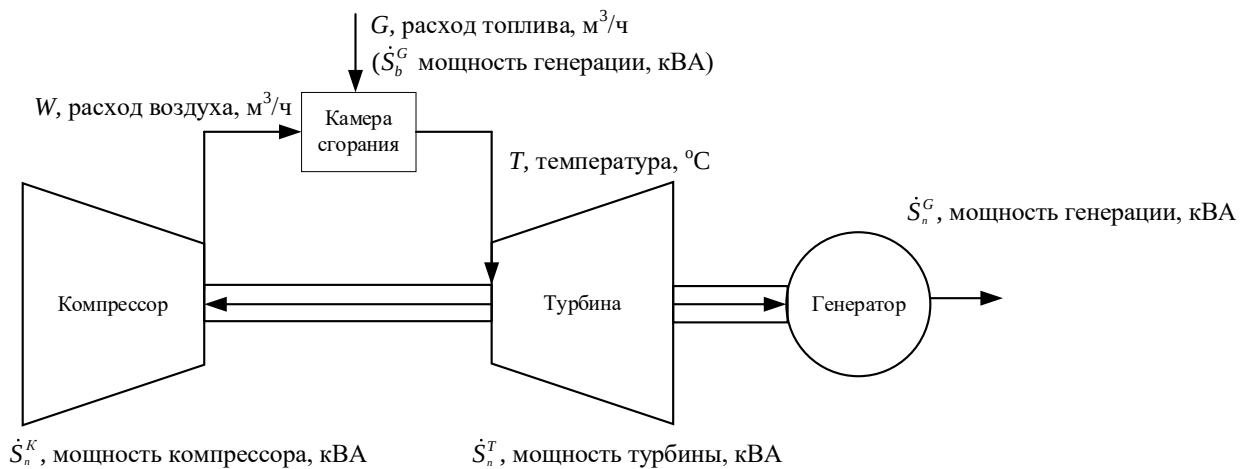


Рисунок 3.1 – Структурная схема газотурбинной установки

На рисунке 3.2 изображен алгоритм работы агента генерации для преобразования топлива в электрическую мощность.

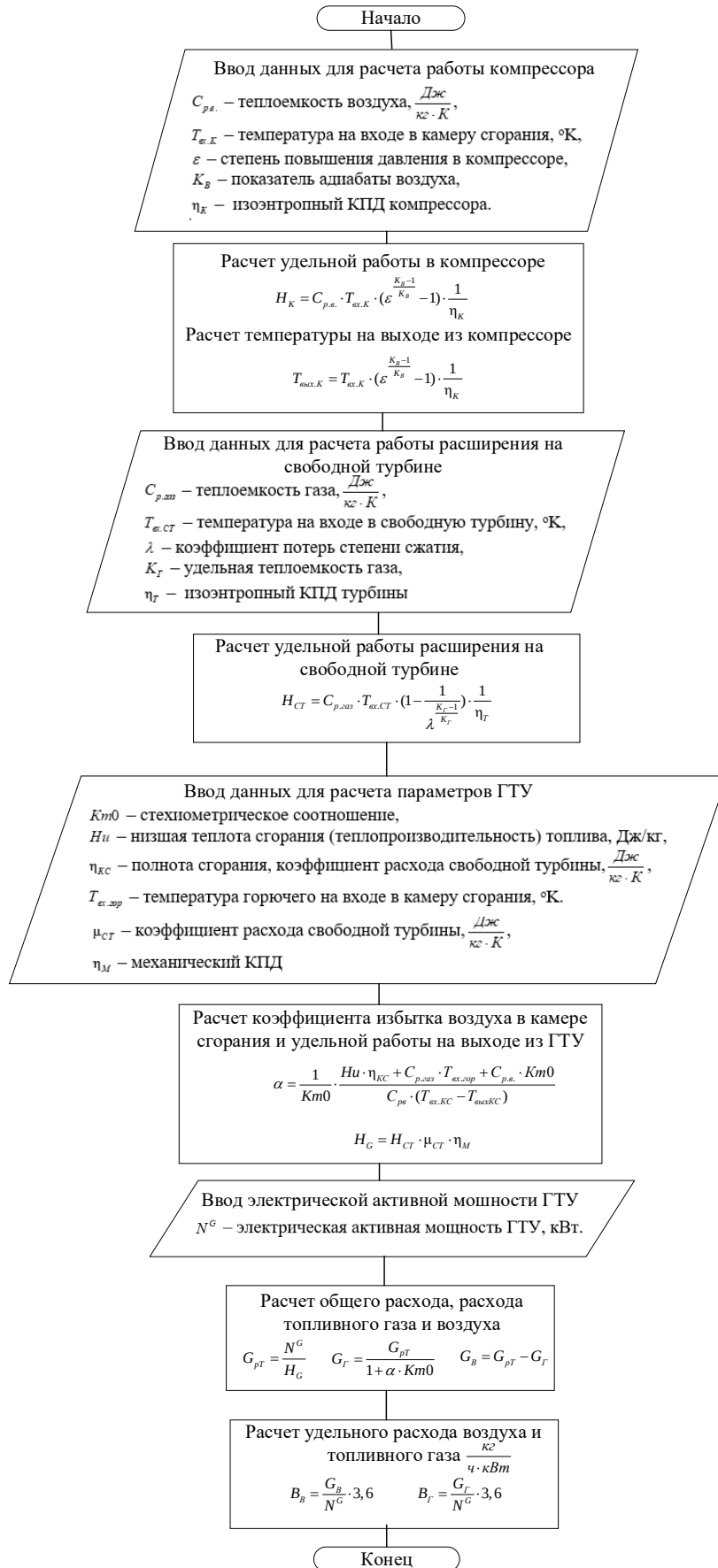


Рисунок 3.2 – Алгоритм работы агента генерации для преобразования топлива в электрическую мощность

Для использования в мультиагентной модели параметры мощности необходимо обозначить комплексным числом, обозначающим полную мощность. Мощность агента генерации:

$$\dot{S}_n^G = \eta_G \cdot (\dot{S}^T - \dot{S}^K), \quad (50)$$

где η_G – КПД генератора, о.е., $\dot{S}^T$ – мощность турбины, кВА,
 $\dot{S}^K$ – мощность, потребляемая компрессором, кВА.

$$\dot{S}^T = f(T) \cdot \eta_T, \quad (51)$$

где η_T – КПД турбины, о.е., $f(T)$ – функция, отражающая зависимость мощность турбины от температуры газа на входе в турбину.

$$T = f(Hu, \alpha), \quad (52)$$

где Hu – низшая теплотворная способность (теплопроизводительность) топлива, Дж/кг, α – коэффициент избытка окислителя (воздуха), о.е.

Топливом является ограниченный запас ПНГ ($\dot{S}_b^G$), выраженный параметром G_T – расход топлива, м³/ч, окислитель – неограниченный запас воздуха, выраженный параметром G_B – расход воздуха, м³/ч.

Учитывая топологию электрической сети нефтегазодобывающего предприятия с объектами распределенной генерации к уравнению баланса мощности, добавляются следующие ограничения на активную мощность:

$$\begin{cases} \sum (P_b^{H1} - P_b^{G2}) - \sum P_d^{H3} - \sum P_i^R \geq 0 \\ P^{G1} - \sum P_t^{H2} \geq 0 \end{cases}. \quad (53)$$

Ограничения означают, что для обеспечения требуемой категории электроснабжения объектов технологического процесса питание должно быть подведено из внешней энергосистемы, в то время как питание объектов механизированной добычи и собственных нужд системы электроснабжения месторождения допускается от объектов распределенной генерации, так же как и питание объектов дополнительной нагрузки (ближайшие населенные пункты, муниципальные учреждения, частный сектор и прочее)

Задача оптимизации баланса мощности сводится к задаче поиска минимума функции:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{S}^{G1} + \sum \dot{S}_b^{G2} - \sum \dot{S}_b^{H1} - \sum \dot{S}_t^{H2} - \sum \dot{S}_d^{H3} - \sum \dot{S}_i^R \rightarrow \min, \\ \text{где } \dot{S} = \sqrt{P^2 + jQ^2}, \\ \sum P_b^{G2} - \sum P_b^{H1} - \sum P_d^{H3} - \sum P_i^R \geq 0, \\ P^{G1} - \sum P_t^{H2} \geq 0, \\ P_{\max}^{G1} \geq \sum P^{G1} \geq P_{\min}^{G1}, \\ P_{\max}^{G2} \geq \sum P_n^{G2} \geq P_{\min}^{G2}, \\ P_{\max}^{H1} \geq \sum P_b^{H1} \geq P_{\min}^{H1}, \\ P_{\max}^{H2} \geq \sum P_t^{H2} \geq P_{\min}^{H2}, \\ P_{\max}^{H3} \geq \sum P_d^{H3} \geq P_{\min}^{H3}, \\ P_{\max}^R \geq \sum P_i^R \geq P_{\min}^R, \end{array} \right. \quad (54)$$

где $P_{\min}^{G1}, P_{\min}^{G2}, P_{\min}^{H1}, P_{\min}^{H2}, P_{\min}^{H3}, P_{\min}^R$ – минимально допустимые по условиям нормального электрического режима ЭТК значения активной мощности соответствующих агентов;

$P_{\max}^{G1}, P_{\max}^{G2}, P_{\max}^{H1}, P_{\max}^{H2}, P_{\max}^{H3}, P_{\max}^R$ – максимально допустимые по условиям нормального электрического режима ЭТК значения активной мощности соответствующих агентов.

В общей постановке задача оптимизации режимов ЭТК является задачей, которая содержит непрерывные и дискретные переменные. При оптимизации баланса мощности в системе электроснабжения используются уравнения установившихся режимов [99, 100, 101].

Значения мощности агентов составляют множество E_z определяющее электрический режим ЭТК НГДП с объектами РГ на пространстве E всех возможных режимов:

$$E_z = \{ \dot{S}^{G1}, \dot{S}_n^{G2}, \dot{S}_b^{H1}, \dot{S}_t^{H2}, \dot{S}_d^{H3}, \dot{S}_i^R \}, \quad (55)$$

где z – номер электрического режима.

Для решения задачи оптимизации используется непрямой метод решения – метод штрафных функций. Если функции $\dot{S}^{G1}, \dot{S}_n^{G2}, \dot{S}_b^{H1}, \dot{S}_t^{H2}, \dot{S}_d^{H3}, \dot{S}_i^R$

– непрерывные на всем пространстве E , тогда функции $A(\dot{S}^{G1}), A(\dot{S}_n^{G2}), A(\dot{S}_b^{H1}), A(\dot{S}_t^{H2}), A(\dot{S}_d^{H3}), A(\dot{S}_i^R)$ – это штрафные функция, при выполнении для каждой условий:

$$A(\dot{S}) = 0 \quad \forall \dot{S} \in E_z, \quad (56)$$

$$A(\dot{S}) \neq 0 \quad \forall \dot{S} \notin E_z. \quad (57)$$

Введем обобщенную функцию ($k = 1, 2, \dots$)

$$F(\dot{S}, k) = \dot{S} + k \cdot A(\dot{S}), \quad (58)$$

где k – коэффициент штрафа, обозначающий сценарий перехода ЭТК из одного электрического режима в другой, а функция $A(\dot{S})$ определяет УВ агента.

Таким образом, при установившемся режиме E_z функция $F(\dot{S}, k)$ почти не отличается от $\dot{S}$ при $\forall \dot{S} \in E_z$, но она возрастает при удалении точки $\dot{S} \notin E_z$ от оптимального значения ближе к границам P_{min} и P_{max} [102].

3.3 Алгоритм обеспечения баланса мощности

При рассмотрении переходных процессов в электрической сети НГДП задача обеспечения баланса мощности может быть сформулирована как задача сохранения показателей качества электроэнергии в допустимых пределах. Индикативным показателем небаланса мощности предлагается использовать отклонение напряжения δU (% от номинального) и отклонение частоты Δf (Гц) [103]:

$$\Delta \dot{S} = \begin{cases} \delta U, \text{ где } \delta U_{\max} = 10\% \\ \Delta f, \text{ где } \Delta f_{\max} = 0,4 \text{ Гц} \end{cases} \quad (59)$$

Для учета структурных изменений в топологии системы электроснабжения нефтегазодобывающего предприятия с объектами распределенной генерации находятся все возможные множества E_z в пространстве E и все возможные сценарии k перехода между ними. Агенты среды взаимодействия следуя сценариям k , при помощи интеллектуальных ключей обеспечивают включение и отключение объектов генерации и потребителей в электрической сети. Количество всех возможных сценариев установившихся электрических режимов ЭТК с номинальными электрическими режимами (пространство всех возможных электрических режимов ЭТК) можно найти как:

$$E = 2^{(i+n+m+1)!} \quad (60)$$

Учитывая условия (51), находится пространство E_z – пространство нормальных электрических режимов ЭТК. В границах E^* для уменьшения величины небаланса мощности $\Delta \dot{S}$ в системе необходимо использовать параметрические изменения функций агентов [104, 105, 106]. Алгоритм методики обеспечения баланса мощности с учетом возможных УВ, предусмотренных в мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ представлен на рисунке 3.3.

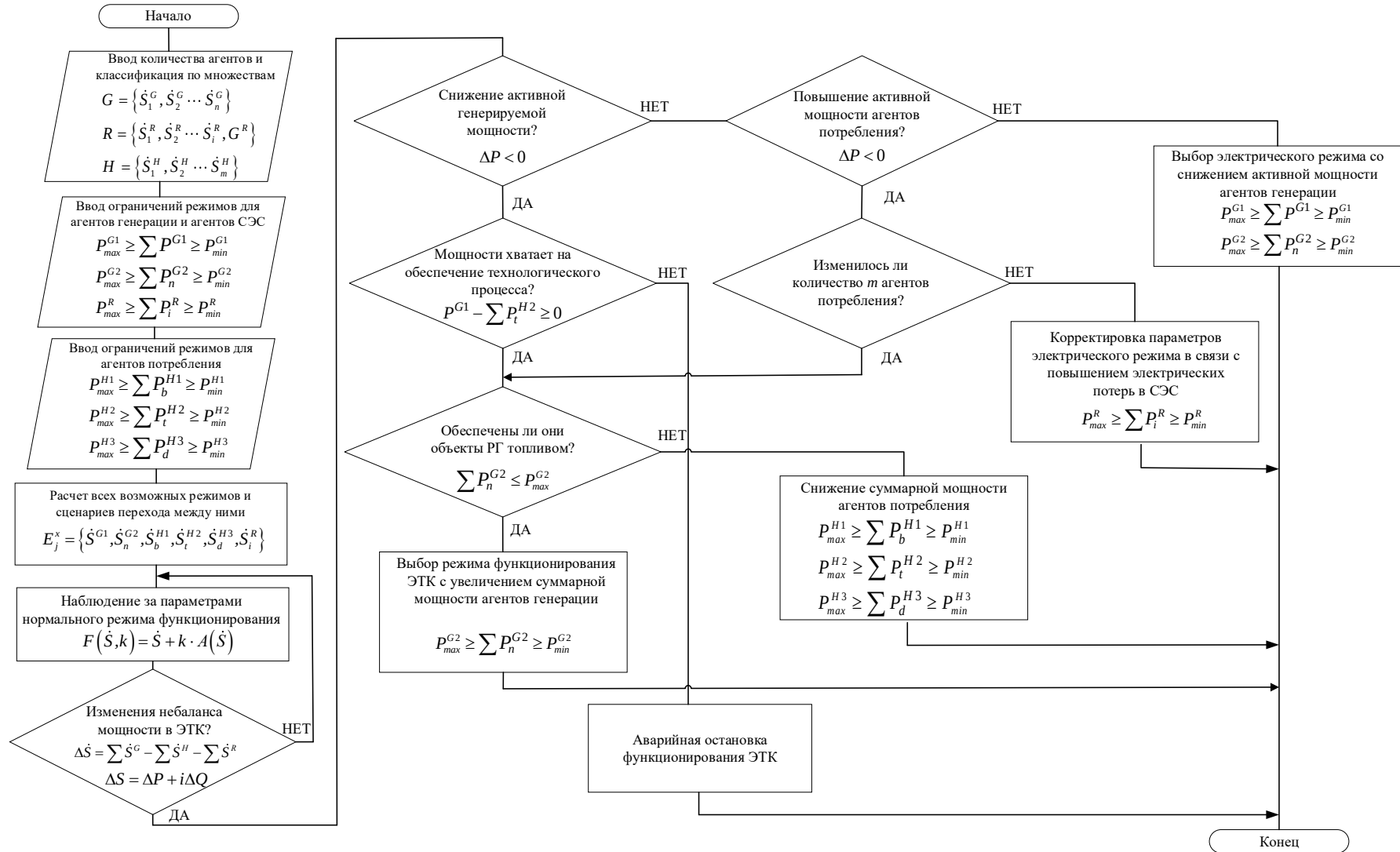


Рисунок 3.3 – Алгоритм обеспечения баланса мощности с учетом возможных УВ, предусмотренных в мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ

3.4 Методика построения пространства возможных электрических режимов и расчет сценариев перехода между ними

Для построения пространства возможных электрических режимов ЭТК и сценариев перехода могут использоваться различные средства моделирования. Программы для моделирования обладают функциональными возможностями для расчета и анализа установившихся режимов, статической и динамической устойчивости. Помимо этого, каждая из программ имеет свои специфику, особенности и ограничения [107 – 113].

Для использования расчетов в мультиагентной модели необходимо, чтобы расчет проводился методом узловых потенциалов, так как агенты на схемах замещения соответствуют узлам электрической сети. Алгоритм создания пространства возможных электрических режимов изображен на рисунке 3.4.

Для расчета установившихся режимов электрической сети в рамках задачи построения пространства возможных электрических режимов был выбран программный пакет *RastrWin3*, а для моделирования переходных процессов, то есть для расчета сценариев перехода между электрическими режимами и создания карты сценариев мультиагентной модели был использован встроенный программный комплекс *RUSTab*.

Программный пакет *RastrWin3* позволяет произвести полный расчет всех электрических параметров режима (токи, напряжения, потоки и потери активной и реактивной мощности во всех узлах и ветвях электрической сети), а также расчет установившихся режимов с учетом частоты.

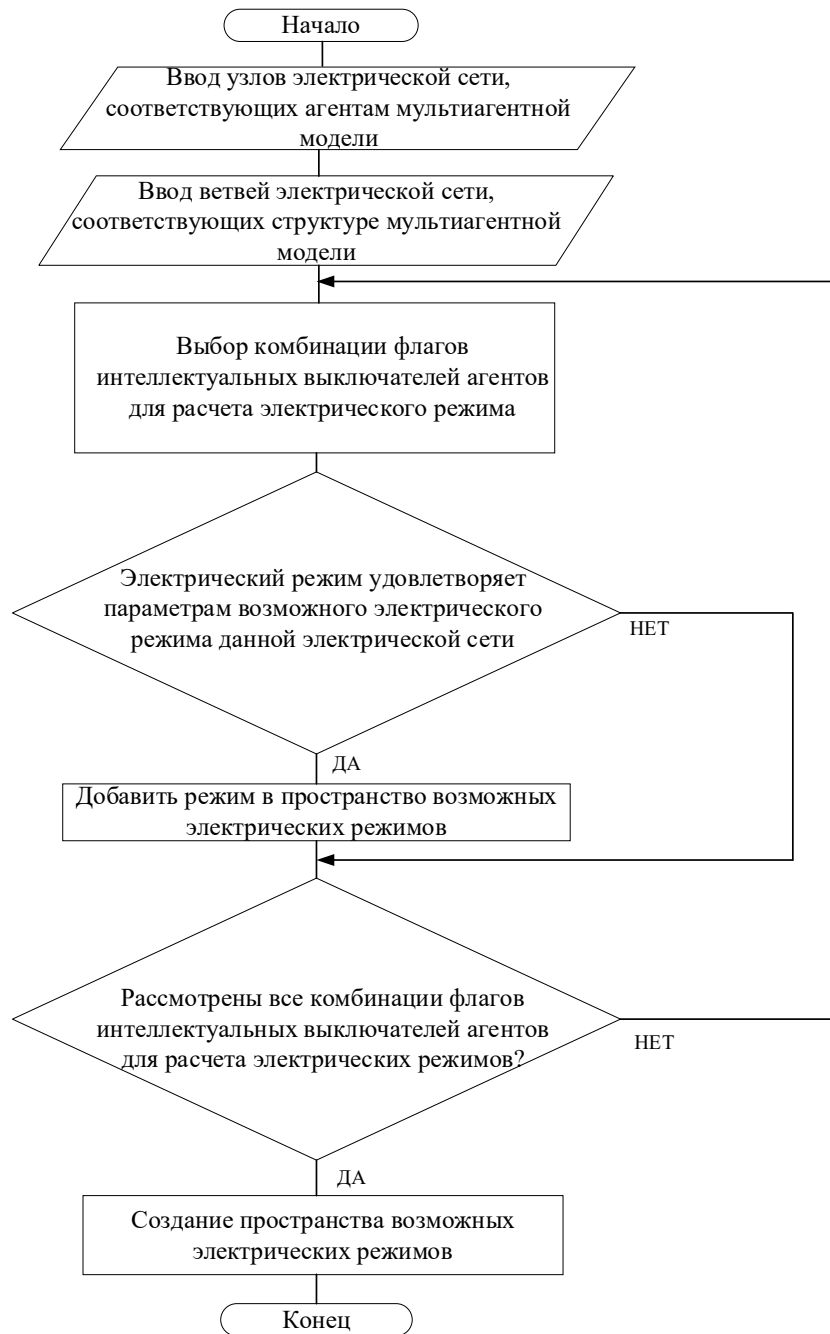


Рисунок 3.4 – Алгоритм создания пространства возможных электрических режимов

Программный комплекс *RUSTab* по умолчанию записывает в файл результатов значения всех переменных системы дифференциально-алгебраических уравнений. Такой объем результатов дает возможность выполнять анализ переходных процессов без ограничений. Алгоритм создания карты сценариев мультиагентной модели изображен на рисунке 3.5.



Рисунок 3.5 – Алгоритм создания карты сценария мультиагентной модели

Пример результатов моделирования нормальной работы электрической сети при активации всех интеллектуальных выключателей на системе электроснабжения Логовского месторождения Пермского края представлен в таблице 3.1. На всех объектах электрической сети месторождения, питающих технологические объекты, организован технический учет электроэнергии, так же на основании данных по добытой жидкости определяются ограничения мультиагентной модели. Объемы добычи ПНГ на месторождении представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.1 – Мощность объектов механизированной добычи

Объект	S , кВА	P , кВт	Q , кВар	I , А
КТП-0101	126,53	68,93	43,83	125,46
КТП-0102	269,25	103,46	74,99	194,33
КТП-0103	247,56	108,91	72,36	198,70
КТП-0104	277,33	151,66	108,23	283,93
КТП-0105	147,50	68,44	41,31	122,08
КТП-0106	354,96	138,60	100,12	259,98
КТП-0107	262,73	199,95	103,16	344,32

Таблица 3.2 – Объемы добычи ПНГ объектами механизированной добычи

Объект	Номер скважины куста	Суммарный дебит куста, м ³ /сут	ПНГ, м ³ /сут
КТП-0101	142	35,64	3778,32
КТП-0102	231, 242	77,23	8186,35
КТП-0103	229, 242	83,17	8816,07
КТП-0104	225, 232, 144	109,90	11649,81
КТП-0105	134	35,64	3778,32
КТП-0106	146, 224, 221	100,99	10705,23
КТП-0107	233, 227	112,87	11964,67
ИТОГО		555,46	58878,75

Обеспечение баланса мощности в электрической сети НГДП с объектами РГ включает в себя задачу по снабжению электроэнергией объектов механизированной добычи за счет добываемого ПНГ. Нагрузка в данном случае представлена КТП, предназначенными для электроснабжения месторождения, к ячейкам КТП присоединено оборудование скважин – установки электроприводных центробежных насосов (УЭЦН).

Проектируемые объекты распределенной генерации – 9 микротурбин, мощностью 200 кВт, общая мощность распределённой генерации 1800 кВт.

На рисунке 3.6. изображена графическая схема узлов и ветвей этой электрической сети, смоделированной в *RastrWin3*.

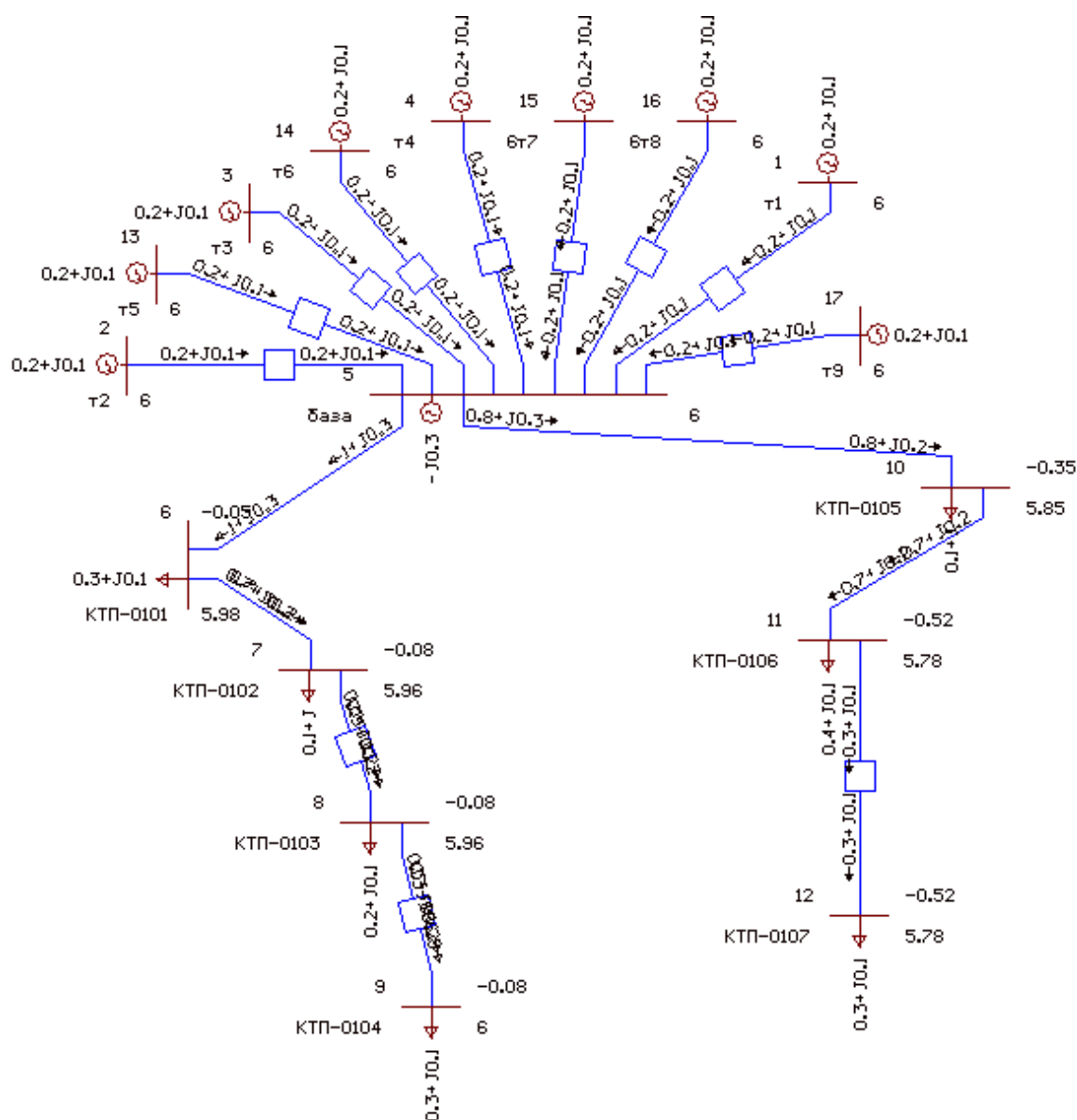


Рисунок 3.6 – Схема электроснабжения фидера 1 ПС «Логовская»

Результаты моделирования сценариев мультиагентной модели ЭТК данного месторождения приведены в таблице 3.3 и на рисунках 3.7-3.9. На рисунках представлены сразу 2 сценария: сначала моделируется переход от нормального режима к режиму с отключением определенной нагрузки, после переходных процессов происходит моделирование нового установившегося режима, а затем воспроизводится сценарий возврата в первоначальный нормальный режим.

Сценарии считаются допустимым, если в процессе переключений напряжение в сети не превышает отклонения в 1%, а изменения частоты в сети не превышает значений в 0,4 Гц.

Таблица 3.3 – Сценарии по отключению нагрузки системы электроснабжения Логовского месторождения

№	Отключенные КТП	Отклонение напряжение δU , %	Отклонение частоты Δf , Гц	Оценка параметров
0.01	КТП-0102	0,1	0,07	Норма
0.02	КТП-0103	0,2	0,13	Норма
0.03	КТП-0101	0,23	0,16	Норма
0.04	КТП-0106	0,31	0,21	Допустимо
0.05	КТП-0101, КТП-0102	0,33	0,22	Допустимо
0.06	КТП-0101, КТП-0103	0,43	0,28	Допустимо
0.07	КТП-0101, КТП-0104	0,56	0,38	Допустимо
0.08	КТП-0101, КТП-0106	0,46	0,33	Допустимо
0.09	КТП-0101, КТП-0104, КТП-0106	0,7	0,65	Недопустимо
0.10	КТП-0101, КТП-0104, КТП-0103	0,58	0,52	Недопустимо
0.11	КТП-0101, КТП-0104, КТП-0107	0,61	0,56	Недопустимо
0.12	КТП-0101, КТП-0104, КТП-0102	0,48	0,41	Недопустимо

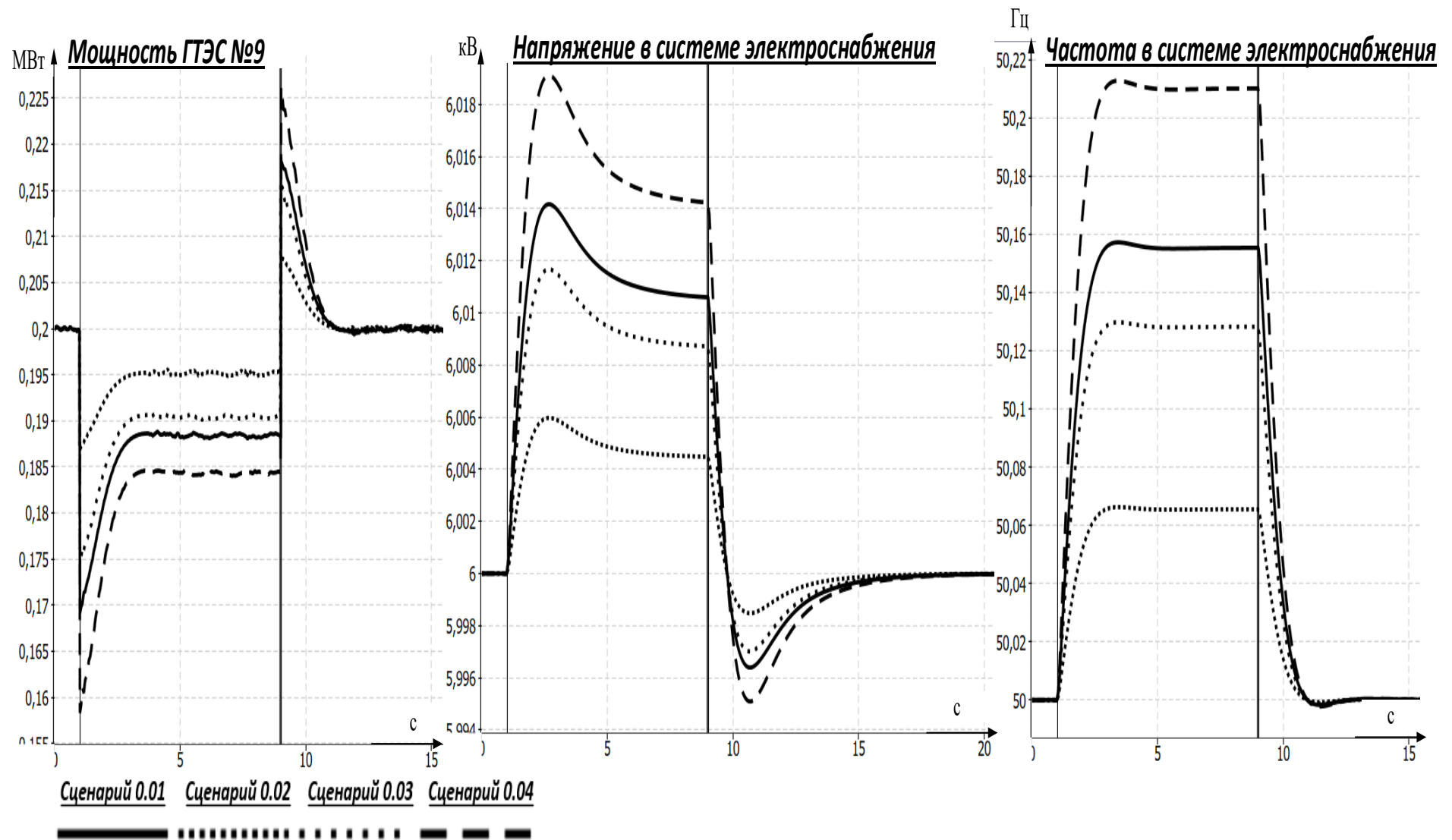


Рисунок 3.7 – Параметры системы электроснабжения при моделировании сценариев с отключением одной КТП

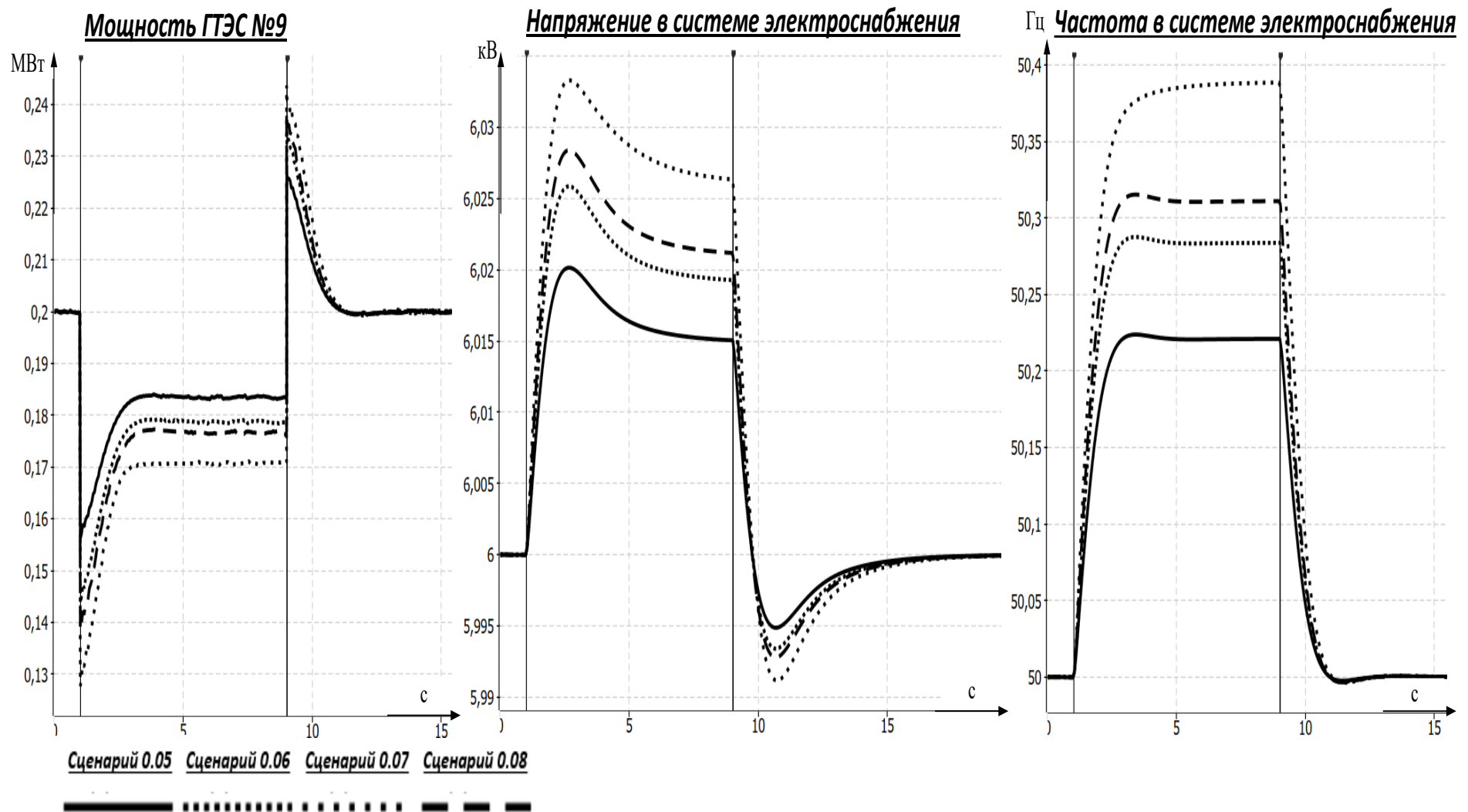


Рисунок 3.8 – Параметры системы электроснабжения при моделировании сценариев с отключением двух КТП
одновременно

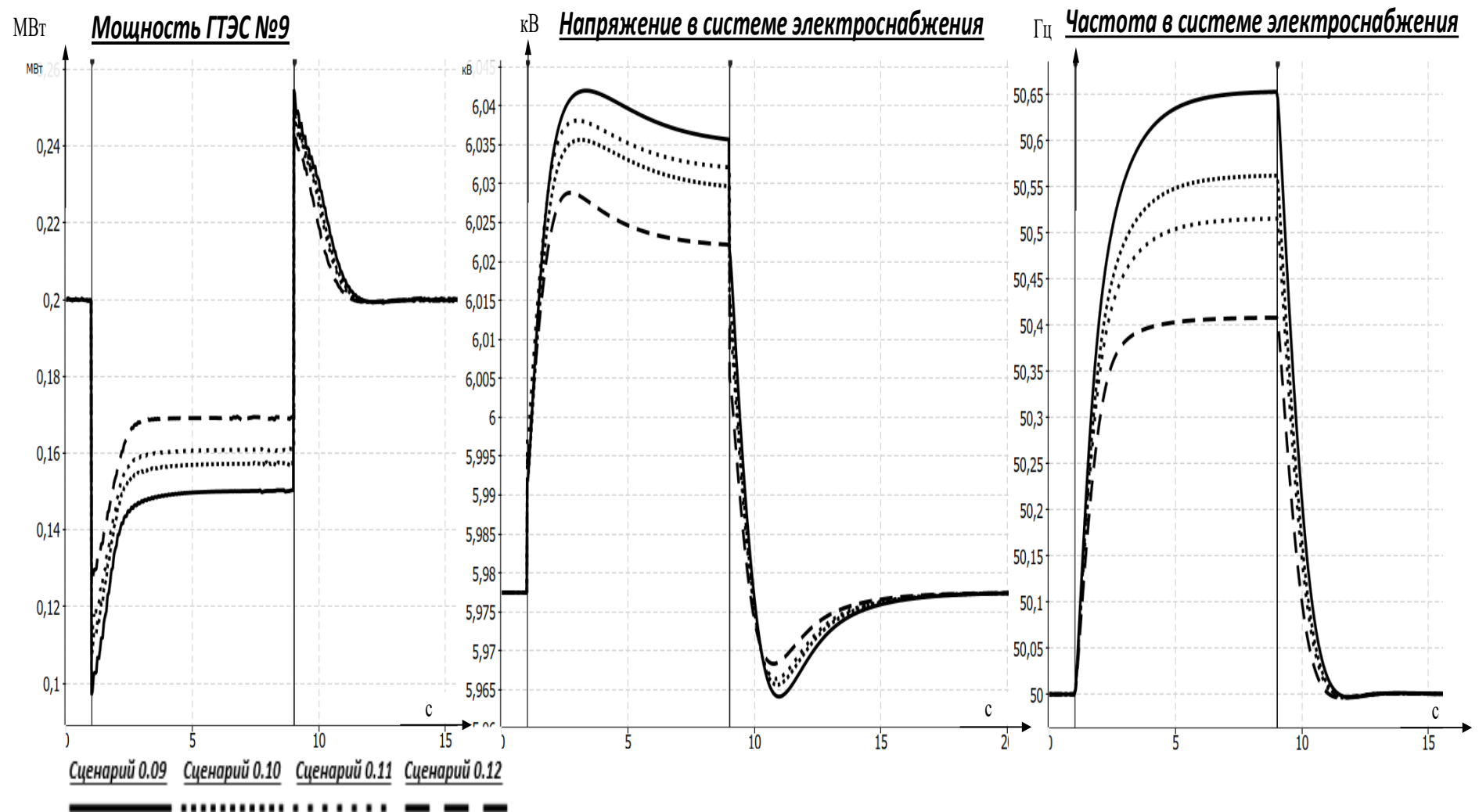


Рисунок 3.9 – Параметры системы электроснабжения при моделировании сценариев с отключением трех КТП
одновременно

Моделирование сценариев с оперативным отключением объектов генерации для обеспечения баланса мощности происходит аналогично.

Примеры результатов моделирования сценариев приведены в таблице 3.4 и на рисунках 3.10 и 3.11. Номер сценария состоит из 2 частей, разделенных точкой – первое число означает количество отключаемых объектов генерации, второе – номер сценария из списка сценариев по отключению нагрузки

На рисунках представлены сразу 2 сценария: сначала моделируется переход от нормального режима к режиму с отключением определенной нагрузки, моделирование переходных процессов происходит в течении 0,5 секунд (время срабатывания устройств релейной защиты и автоматики), а затем воспроизводится сценарий перехода в режим с отключением нагрузки и объектов генерация для обеспечения баланса мощности.

Таблица 3.4 – Сценарии по отключению ГТУ для обеспечения баланса мощности

№	Сценарий отключения нагрузки	Кол-во отключенных ГТУ,	Отклонение напряжение δU , %	Отклонение частоты Δf , Гц	Оценка параметров
1.04	0.04	1	0,2	0,12	Норма
1.05	0.05	1	0,22	0,14	Норма
1.06	0.06	1	0,3	0,19	Норма
1.07	0.07	1	0,35	0,23	Допустимо
2.09	0.09	2	0,58	0,37	Допустимо
2.10	0.10	2	0,48	0,31	Допустимо
2.11	0.11	2	0,43	0,27	Допустимо
2.12	0.12	2	0,35	0,22	Допустимо

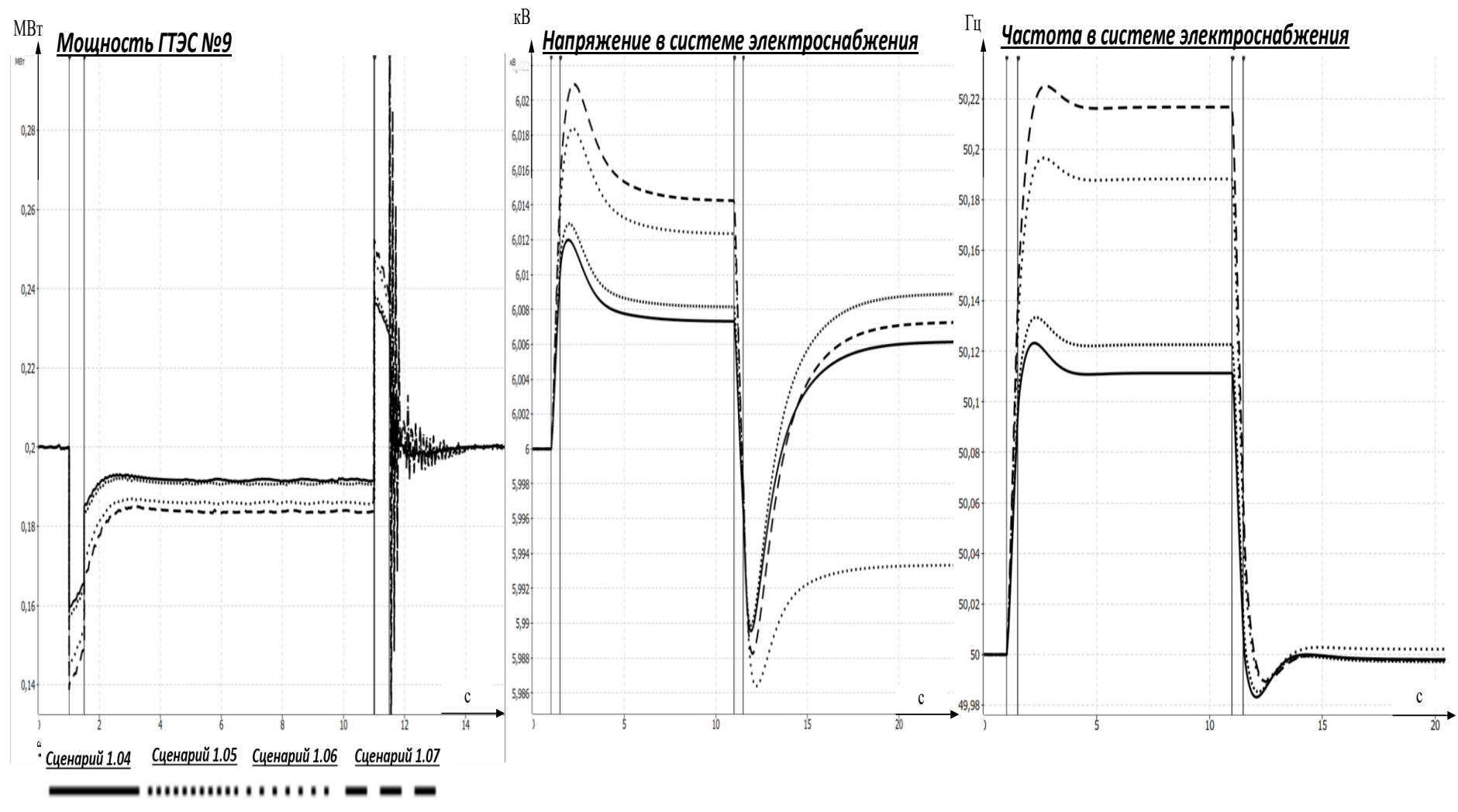


Рисунок 3.10 – Параметры системы электроснабжения при моделировании сценариев с отключением одного объекта генерации

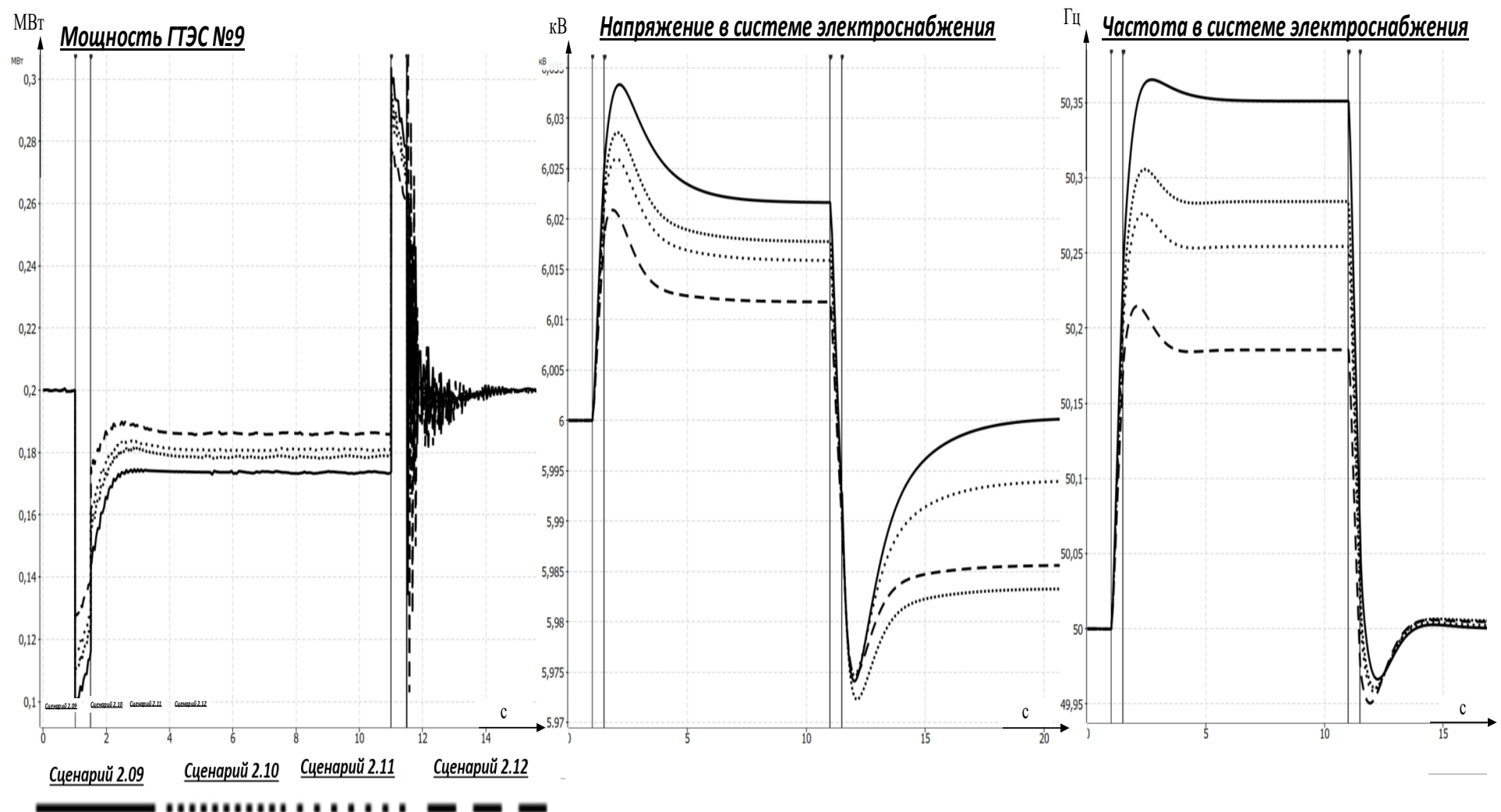


Рисунок 3.11 – Параметры системы электроснабжения при моделировании сценариев с отключением двух объектов генерации одновременно

Карта возможных сценариев мультиагентной модели ЭТК Логовского месторождения представлена на рисунке 3.12.

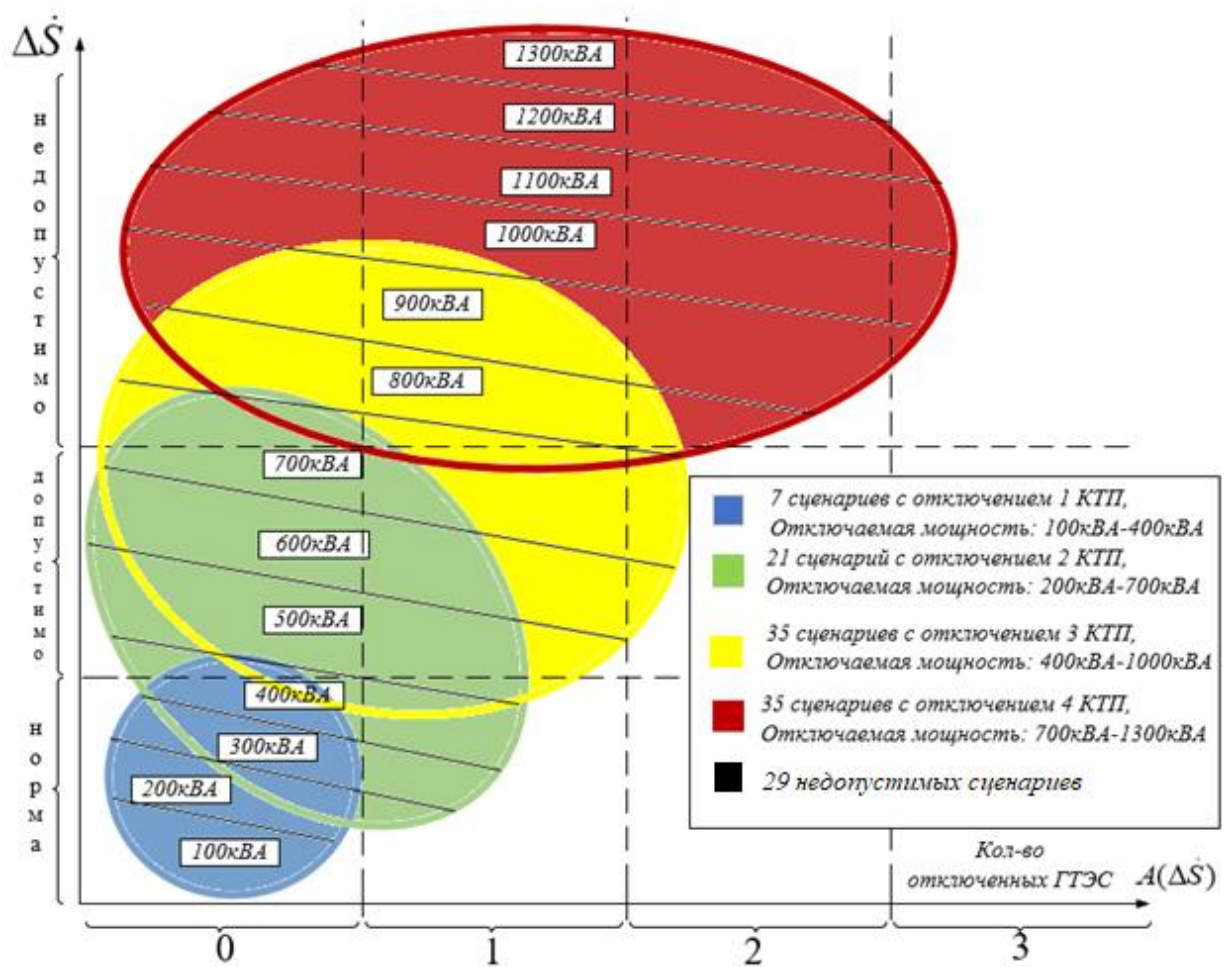


Рисунок 3.12 – Карта возможных сценариев мультиагентной модели ЭТК Логовского месторождения

Выводы по главе 3

1. Анализ структуры нефтегазодобывающего предприятия с объектами распределенной генерации показал, что при реализации мультиагентной модели для обеспечения баланса мощности целесообразно использовать системные методы расчета уравнений установившихся режимов.
2. Разработана методика обеспечения баланса мощности, которая позволяет учитывать структурные и параметрические изменения в топологии системы электроснабжения нефтегазодобывающего предприятия с объектами распределенной генерации.
3. Разработан алгоритм работы мультиагентной модели с учетом методики обеспечения баланса мощности в пространстве возможных электрических режимов ЭТК нефтегазодобывающего предприятия с объектами распределенной генерации и карты возможных сценариев.
4. Разработана методика построения пространства возможных электрических режимов ЭТК НГДП с объектами РГ.

4 РАЗРАБОТКА МУЛЬТИАГЕНТНОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ С ОБЪЕКТАМИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

4.1 Разработка программного обеспечения для моделирования структуры и принципов взаимодействия агентов мультиагентной модели

НГДП с объектами РГ имеет структуру, которая состоит из типовых блоков, следовательно, для создания мультиагентной модели ЭТК применим объектно-ориентированный подход. Предлагается программная реализация в среде графического программирования *LabVIEW*. Данный выбор обусловлен следующими причинами.

- 1) *LabVIEW* содержит встроенные средства визуализации, используемые для создания пользовательского интерфейса;
- 2) в *LabVIEW* реализована возможность сопряжения с реальным оборудованием и обработки данных, получаемых с промышленных контроллеров.

Применение *LabVIEW* позволит получать информацию из различных автоматизированных систем сбора данных нефтегазодобывающего предприятия в режиме реального времени. На основании полученной информации будет выполняться моделирование и производится оценка баланса мощности текущего электрического режима.

На основании представленных в предыдущих главах структуры, принципов взаимодействия и методики обеспечения баланса мощности; разработана мультиагентная модель электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия с объектами распределенной генерации в среде графического программирования *LabVIEW* с применением объектно-ориентированного подхода. Сформированы классы объектов, описаны их свойства и реализуемые ими функции (методы).

4.1.1 Описание элементов ЭТК НГДП с объектами РГ в рамках мультиагентного подхода

Объектами класса «Скважина» являются различные типы оборудования для добычи нефтегазовой жидкости в связке с приборами учета параметров технологического процесса. На основании анализа особенностей функционирования объекта в рамках мультиагентной модели, определены следующие свойства класса «Скважина»:

- активная потребляемая мощность;
- коэффициент мощности;
- дебит жидкости;
- газовый фактор;
- включен/выключен объект

Свойства этого класса имеют особенность – они имитируют погрешность показаний соответствующих приборов измерения.

Класс «Скважина» содержит следующие методы:

- показания активной потребляемой мощности (P);
- показания реактивной потребляемой мощности (Q);
- дебит попутного нефтяного газа (G);
- полная потребляемая мощность (S).

Блок-диаграмма виртуального прибора (ВП) в среде *LabVIEW* класса «Скважина» представлена на рисунке 4.1.

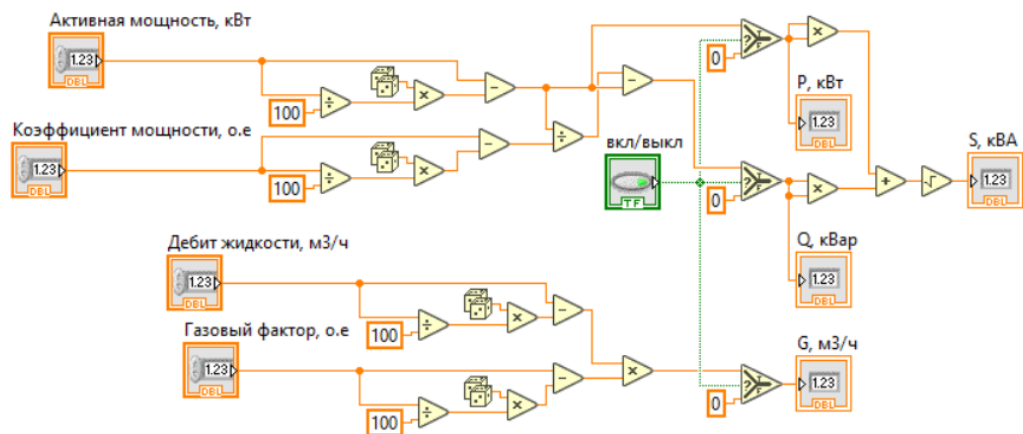


Рисунок 4.1 – Блок-диаграмма ВП класса «Станция управления»

Объектами класса «Пункт сбора газа» являются различные типы оборудования для сбора и сепарации ПНГ в связке с приборами учета параметров технологического процесса. Один объект «Пункт сбора газа» может быть связан с несколькими объектами «Скважина». На основании анализа особенностей функционирования объекта в рамках мультиагентной модели, определены следующие свойства класса «Пункт сбора газа»:

- активная потребляемая мощность (P_{CH});
- реактивная потребляемая мощность (Q);
- включен/выключен объект.

Основная функция этого объекта – определять режим функционирования объектов «Скважина» и суммировать показания объектов.

Класс «Пункт сбора газа» содержит следующие методы:

- суммарные показания активной потребляемой мощности (P);
- суммарные показания реактивной потребляемой мощности (Q);
- суммарный дебит попутного нефтяного газа (G);
- суммарная полная потребляемая мощность (S).

Блок-диаграмма ВП в среде *LabVIEW* класса «Пункт сбора газа», связанного с тремя объектами класса «Скважина» представлена на рисунке 4.2.

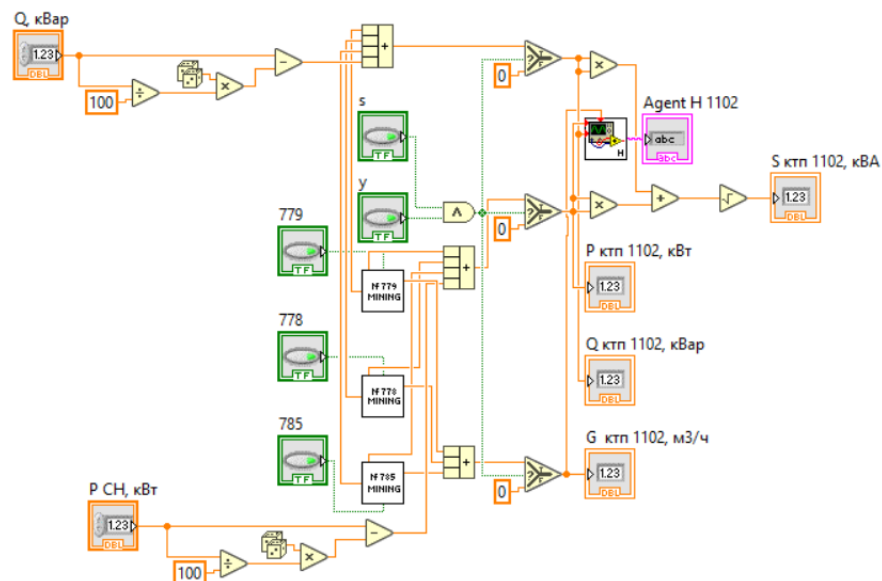


Рисунок 4.2 – Блок-диаграмма ВП класса «Пункт сбора газа»

Объектами класса «Микротурбина» являются различные типы (марки) микротурбинных установок в связке с приборами учета. На основании анализа особенностей функционирования объекта в рамках мультиагентной модели, определены следующие свойства класса «Микротурбина»:

- коэффициент состава газа;
- включен/выключен объект.

Основная функция этого объекта – определять расход топлива в зависимости от состава газа.

Класс «Микротурбина» содержит следующие методы:

- активная генерируемая мощность;
- расход топлива;

Блок-диаграмма ВП в среде *LabVIEW* класса «Микротурбина» для объекта мощностью 200 кВт и номинальным расходом 71,4 м³/ч представлена на рисунке 4.3.

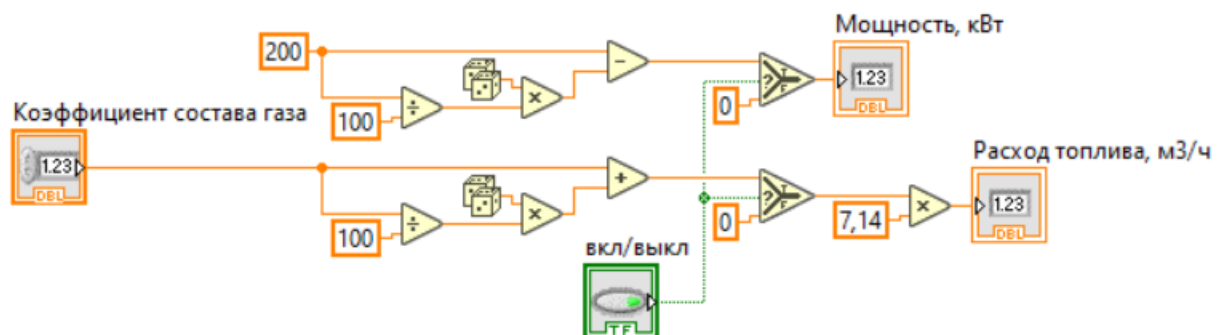


Рисунок 4.3 – Блок-диаграмма ВП класса «Микротурбина»

Объектами класса «Газотурбинная электростанция» являются электростанции с автоматической системой регулирования мощности. На основании анализа особенностей функционирования объекта в рамках мультиагентной модели, определены следующие свойства класса «Газотурбинная электростанция»:

- запрос активной мощности (запрос P);
- коэффициент состава газа.

Основная функция этого объекта – регулировать выдаваемую в сеть активную мощность в зависимости от запроса электрической сети.

Класс «Газотурбинная электростанция» содержит следующие методы:

- расход ПНГ;
- выдача активной мощности в электрическую сеть (PG).

Блок-диаграмма ВП в среде *LabVIEW* класса «Газотурбинная электростанция» для объекта, состоящего из 8 микротурбин, распределенных на два фидера (№ 11 и №19) представлена на рисунке 4.4.

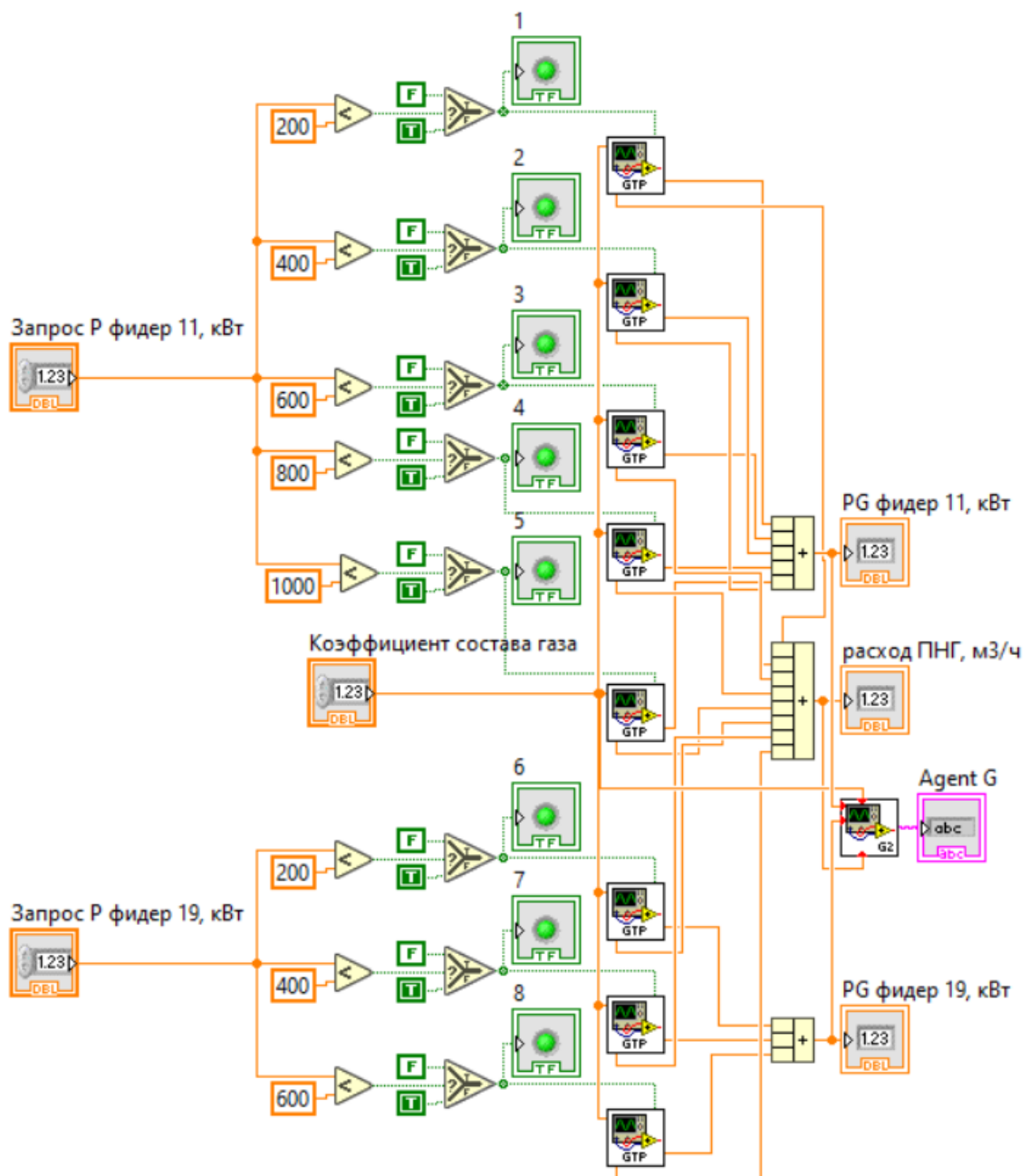


Рисунок 4.4 – Блок-диаграмма ВП класса «Газотурбинная электростанция»

Объектами класса «КТП» являются узлы электрической сети, соответствующие различным ЛЭП с отпайками к нагрузке в виде КТП. Каждой КТП соответствует объект класса «КТП». Свойства класса «КТП»:

- активная мощность перед отпайкой к КТП (P_G);
- реактивная мощность перед отпайкой к КТП (Q_G);
- активная мощность КТП ($P_{\text{КТП}}$);
- реактивная мощность КТП ($Q_{\text{КТП}}$);
- режим работы ЛЭП перед отпайкой к КТП;
- режим работы КТП.

Свойства этого класса имитируют погрешность показаний соответствующих приборов измерения, а также учитывают потери в ЛЭП.

Класс «КТП» содержит следующие методы:

- показания активной потребляемой мощности (P);
- показания реактивной потребляемой мощности (Q);
- полная потребляемая мощность (S);
- активная мощность после отпайки к КТП;
- реактивная мощность после отпайки к КТП.

Блок-диаграмма ВП в среде *LabVIEW* класса «КТП», представлена на рисунке 4.5.

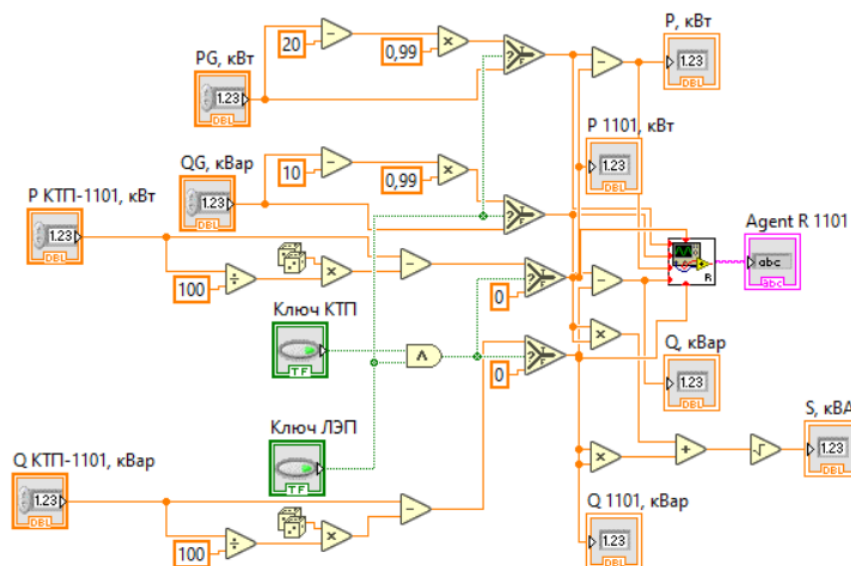


Рисунок 4.5 – Блок-диаграмма ВП класса «КТП»

Объектами класса «ЛЭП» являются участки различных ЛЭП с несколькими отпайками к нагрузке в виде КТП. Свойство класса «ЛЭП»:

- режим работы каждого участка с отпайкой к КТП.

Свойства этого класса имитируют взаимосвязь режимов работы участков ЛЭП. Блок-диаграмма ВП в среде *LabVIEW* класса «ЛЭП», состоящего из 4 участков с отпайками к КТП представлена на рисунке 4.6.

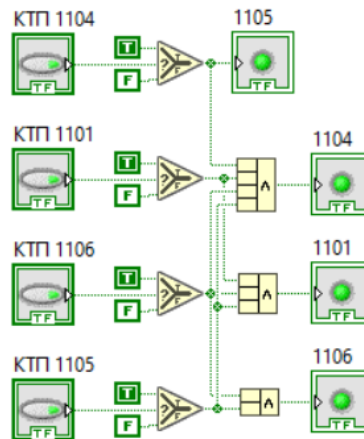


Рисунок 4.6 – Блок-диаграмма ВП класса «ЛЭП»

Объектами класса «АВР» являются устройства АВР.

Свойство класса «АВР»:

- режим работы каждого ввода;
- режим работы устройства АВР.

Свойства этого класса имитируют работу устройства АВР. Блок-диаграмма ВП в среде *LabVIEW* класса «АВР», представлена на рисунке 4.7.

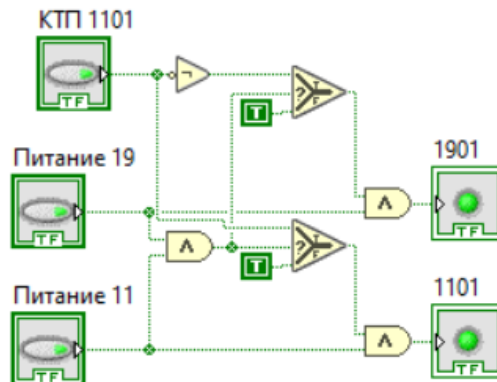


Рисунок 4.7 – Блок-диаграмма ВП класса «АВР»

4.1.2 Описание агентов мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ в среде *LabView*

Внедрение мультиагентной модели подразумевает техническую и организационную модернизацию, необходим способ включения/отключения элементов электрической сети по результатам расчета небаланса мощности. Если допустить, что на электротехническом комплексе нефтедобывающего предприятия в полном объеме применимы технологии интеллектуальных электрических сетей, но в состав мультиагентной модели мульти должны быть включены информационно-измерительные комплексы, работающие в онлайн-режиме и обеспечивающие мониторинг состояния электрооборудования.

При отсутствии однородного программно-технического комплекса, реализующего одновременно функции измерения мощности, измерение показателей качества электрической энергии и управления нагрузкой, первым шагом будет создание виртуальной среды взаимодействия агентов, которые используют реальные данные, собираемые с реальных объектов, но обеспечение баланса мощности происходит по алгоритмам децентрализованного управления, таким образом будто каждый агент имеет необходимый набор датчиков, средств связи и исполнительных механизмов в реальном мире, а не в виртуальной среде.

Объектами класса «Агент потребления» являются промышленные контроллеры, установленные на объектах технологического процесса добычи нефти и газа. Свойства этого класса имитируют показания соответствующих приборов измерения, а также ведут статистику параметров:

- активная потребляемая мощность (P_H);
- реактивная потребляемая мощность (Q_H);
- дебит попутного нефтяного газа (G_H).

Блок-диаграмма ВП и пользовательский интерфейс в среде *LabVIEW* класса «Агент потребления», представлена на рисунке 4.8.

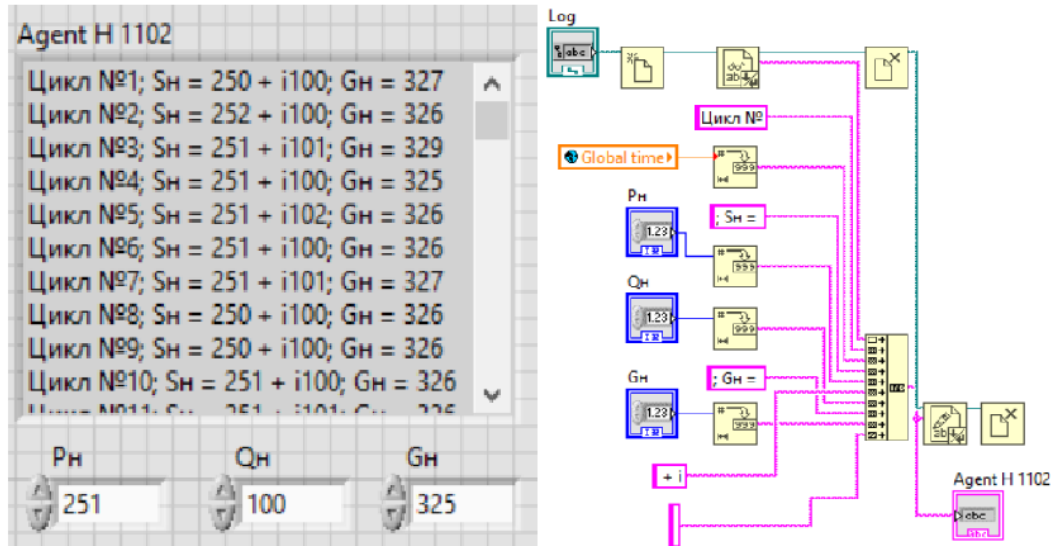


Рисунок 4.8 – Блок-диаграмма ВП класса «Агент потребления»

Объектами класса «Агент генерации» являются промышленные контроллеры в составе автоматической системы регулирования мощности ГТЭС. Свойства этого класса имитируют показания соответствующих приборов измерения, а также ведут статистику параметров:

- расход ПНГ;
- выдача активной мощности в электрическую сеть (P);
- коэффициент состава газа (К. ПНГ).

Блок-диаграмма ВП и пользовательский интерфейс в среде *LabVIEW* класса «Агент генерации» для двух фидеров, представлена на рисунке 4.9.

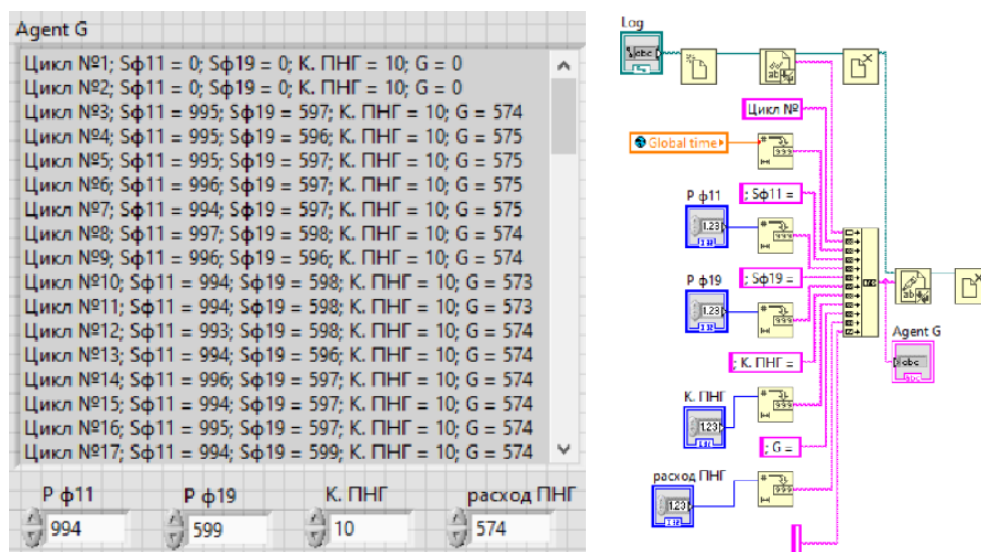


Рисунок 4.9 – Блок-диаграмма ВП класса «Агент генерации»

Объектами класса «Агент системы электроснабжения» являются промышленные контроллеры в составе системы электроснабжения месторождения нефти и газа. Свойства этого класса имитируют показания соответствующих приборов измерения, а также ведут статистику параметров:

- активная мощность, входящая в узел электрической сети ($P_{вх}$);
- реактивная мощность, входящая в узел электрической сети ($Q_{вх}$);
- активная мощность, потребляемая нагрузкой этого узла ($P_{ктп}$);
- реактивная мощность, потребляемая нагрузкой этого узла ($Q_{ктп}$);
- активная мощность, исходящая из узла электрической сети ($P_{вых}$);
- реактивная мощность, исходящая из узла электрической сети ($Q_{вых}$);

Блок-диаграмма ВП и пользовательский интерфейс в среде *LabVIEW* класса «Агент системы электроснабжения», представлена на рисунке 4.10.

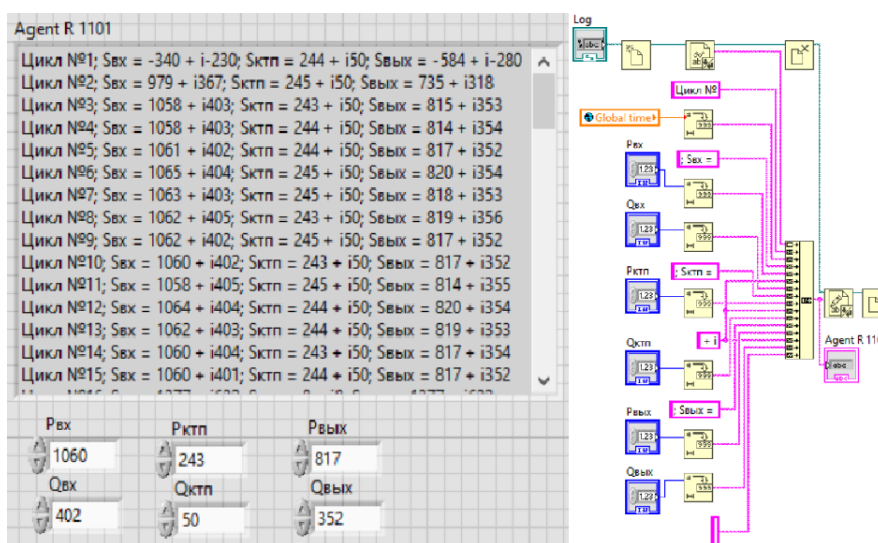


Рисунок 4.10 – Блок-диаграмма ВП класса «Агент системы электроснабжения»

Объектами класса «Агент компрессорной станции» являются промышленные контроллеры в составе дожимной компрессорной станции, обслуживающей технологический процесс добычи нефти и газа. Свойства этого класса имитируют показания соответствующих приборов измерения, а также ведут статистику параметров:

- дебит газа, добываемого на месторождение (G_n);
- дебит газа, используемого для генерации (G);
- дебит газа, используемого для дальней переработки (G_{pro});

Блок-диаграмма ВП и пользовательский интерфейс в среде *LabVIEW* класса «Агент компрессорной станции», представлена на рисунке 4.11.

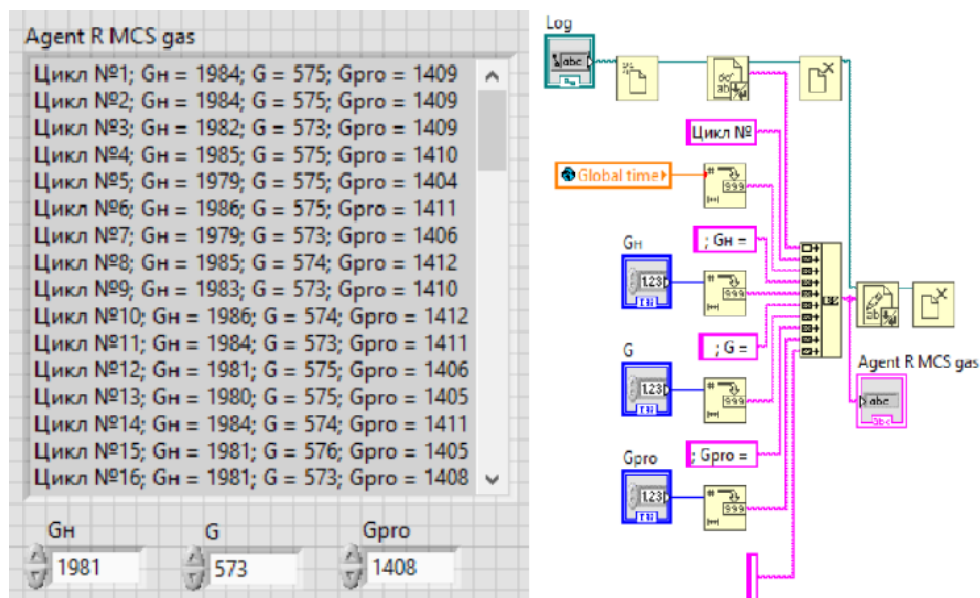


Рисунок 4.11 – Блок-диаграмма ВП класса «Агент компрессорной станции»

Объектами класса «Агент внешней сети» являются промышленные контроллеры в составе подстанции, питающие энергетические объекты месторождения нефти и газа. Свойства этого класса имитируют показания соответствующих приборов измерения, а также ведут статистику параметров:

- активная мощность, поступающая из внешней сети ($PG1$);
- реактивная мощность, поступающая из внешней сети ($QG1$);
- активная мощность, генерируемая объектами генерации ($PG2$);
- реактивная мощность, генерируемая объектами генерации ($QG2$);
- активная мощность, потребляемая энергообъектами месторождения (PH);
- реактивная мощность, потребляемая энергообъектами месторождения (QH);
- баланс активной мощности в сети;

– баланс реактивной мощности в сети;

Блок-диаграмма ВП и пользовательский интерфейс в среде *LabVIEW* класса «Агент системы электроснабжения», представлена на рисунке 4.12.

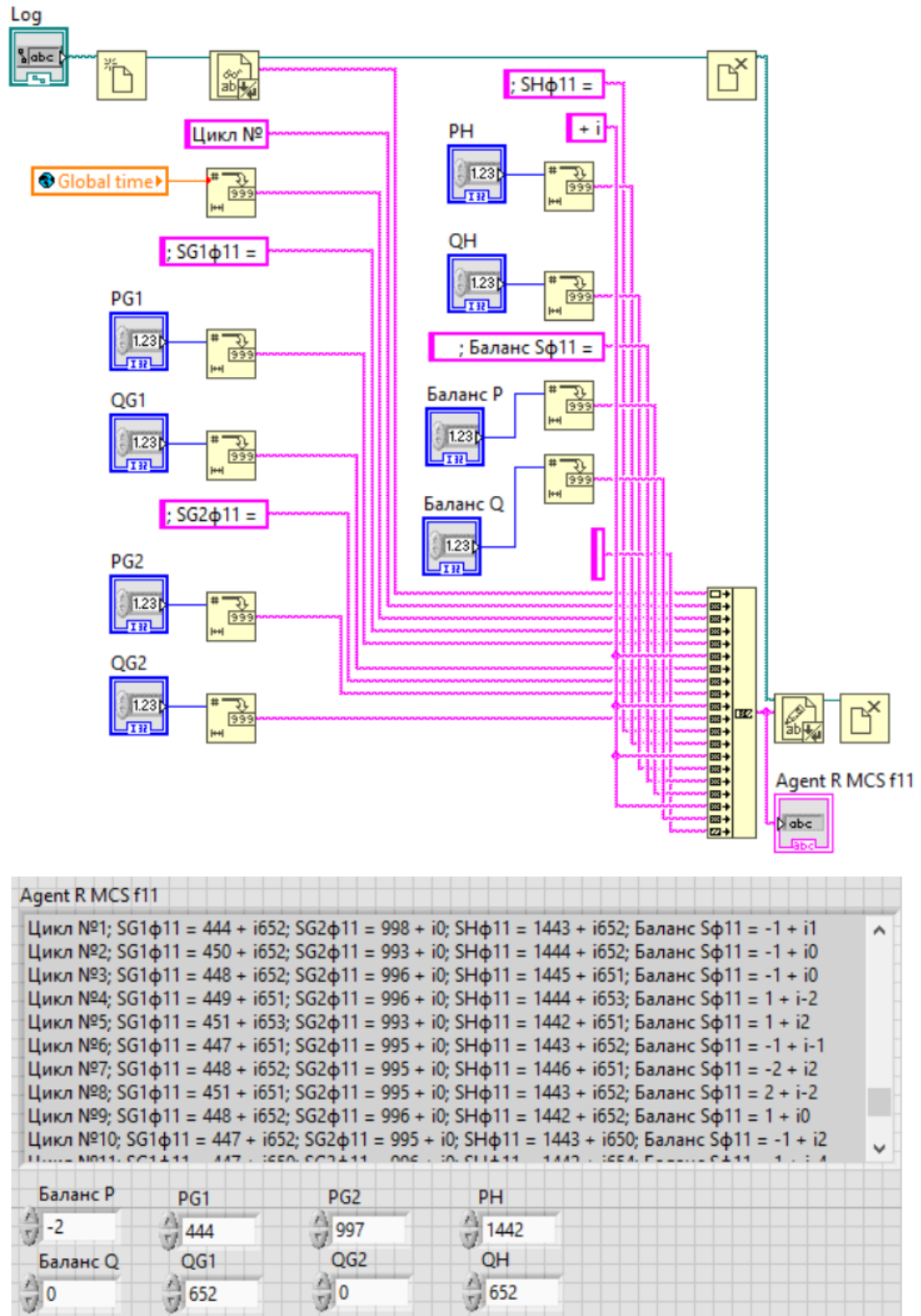


Рисунок 4.12 – Блок-диаграмма ВП класса «Агент внешней сети»

4.1.3 Описание структуры мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ в среде *LabView*

При составлении мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ используются различные базы объектов, каждая из которых осуществляет свои функции:

- 1) библиотека объектов генерации [114] содержит параметры объектов, используемые при моделировании, соответствующие внесенным маркам оборудования;
- 2) библиотека объектов технологического процесса [115] содержит типовые объекты, используемые при моделировании (Приложение А);
- 3) библиотека объектов системы электроснабжения [116] содержит объекты для создания типовых структур, для конструкции необходимой топологии сети (Приложение Б);
- 4) пространство возможных режимов функционирования ЭТК, формирующееся в процессе создания мультиагентной модели ЭТК;
- 5) карта возможных сценариев и перечень управляющих воздействия мультиагентной ЭТК НГДП с объектами РГ, формирующиеся в процессе функционирования мультиагентной модели.

Апробация структуры, принципов взаимодействия мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ и методики обеспечения баланса мощности выполнена для системы электроснабжения Южного купола Юрчукского месторождения. Месторождение запитывается от ПС «Юрчук» 110/6 кВ от двух фидеров. Система электроснабжения состоит из 10 комплектных трансформаторных подстанций (КТП) мощностью около 250 кВА, КТП каждая, КТП распределены по 4 кустам, на фидере 19 – 1 куст нефтедобычи, на 11 – 3 куста. Проектируемые объекты распределенной генерации – 8 микротурбин мощностью 200 кВт, общая мощность распределённой генерации 1600 кВт. Структура мультиагентной модели ЭТК Южного купола Юрчукского месторождения и фрагмент пользовательского интерфейса реализованного в *LabVIEW* представлена на рисунке 4.13.

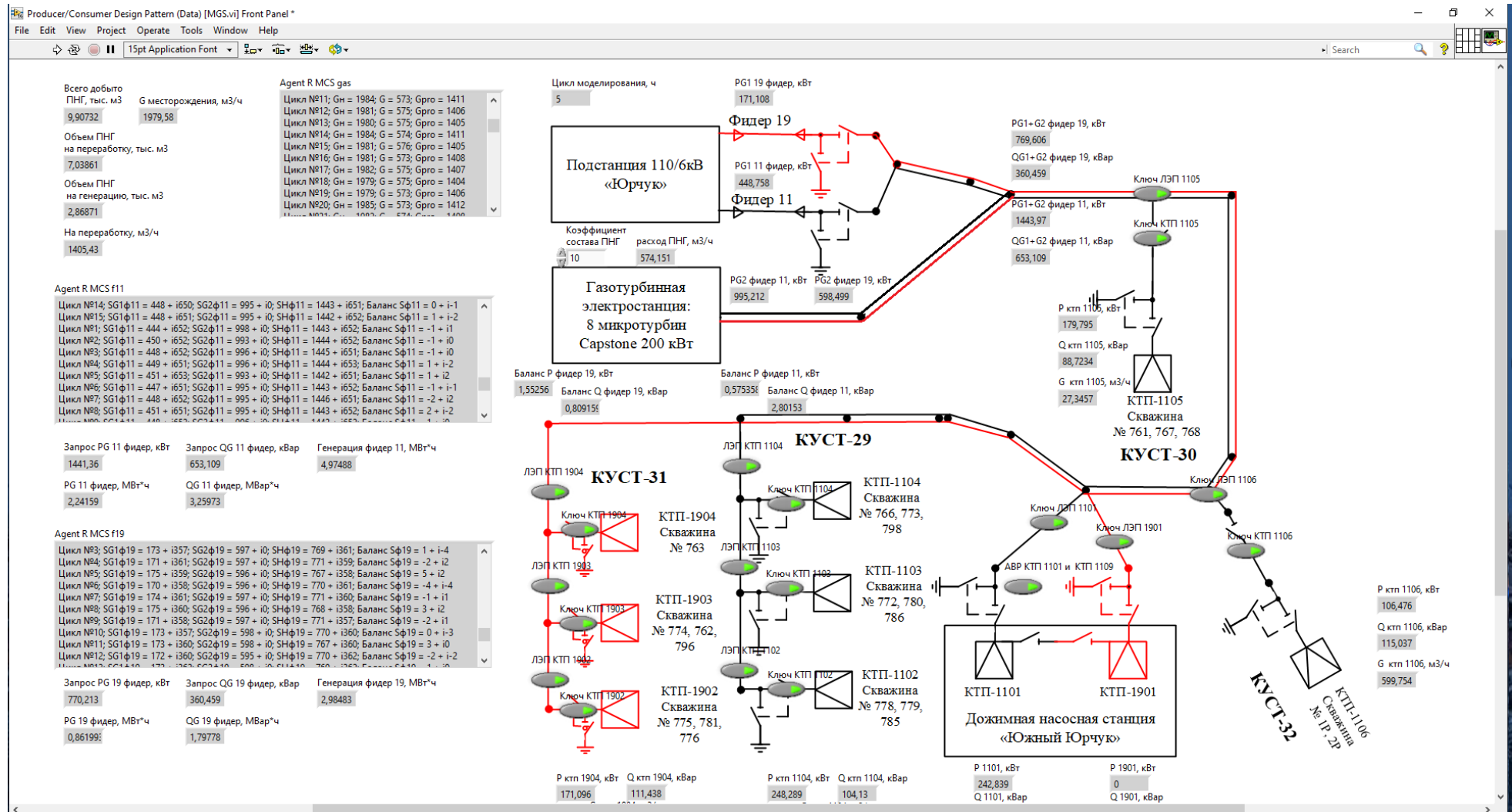


Рисунок 4.13 – Пользовательский интерфейс мультиагентной модели ЭТК Южного купола Юрчукского месторождения

Интерфейс показывает потоки мощности на всех участках электрической сети, учитывая разделение нагрузки на два фидера. Конечным результатом является расчета баланса мощности при текущем электрическом режиме. Также интерфейс отображает показатели добычи ПНГ, его расход на генерацию мощности и транспортировку на дальнейшую переработку. Конечным результатом является расчет баланса топлива при текущем электрическом режиме ЭТК НГДП с объектами РГ. Рассмотренный подход к мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ позволяет произвольно изменять структуру системы, уточнять или изменять модели объектов без ущерба для моделей других элементов, наращивать библиотеки типовых моделей, т.е. обеспечивать возможность развития моделей объектов ЭТК. Структурная схема мультиагентной модели ЭТК Южного купола Юрчукского месторождения изображена на рисунке 4.14.

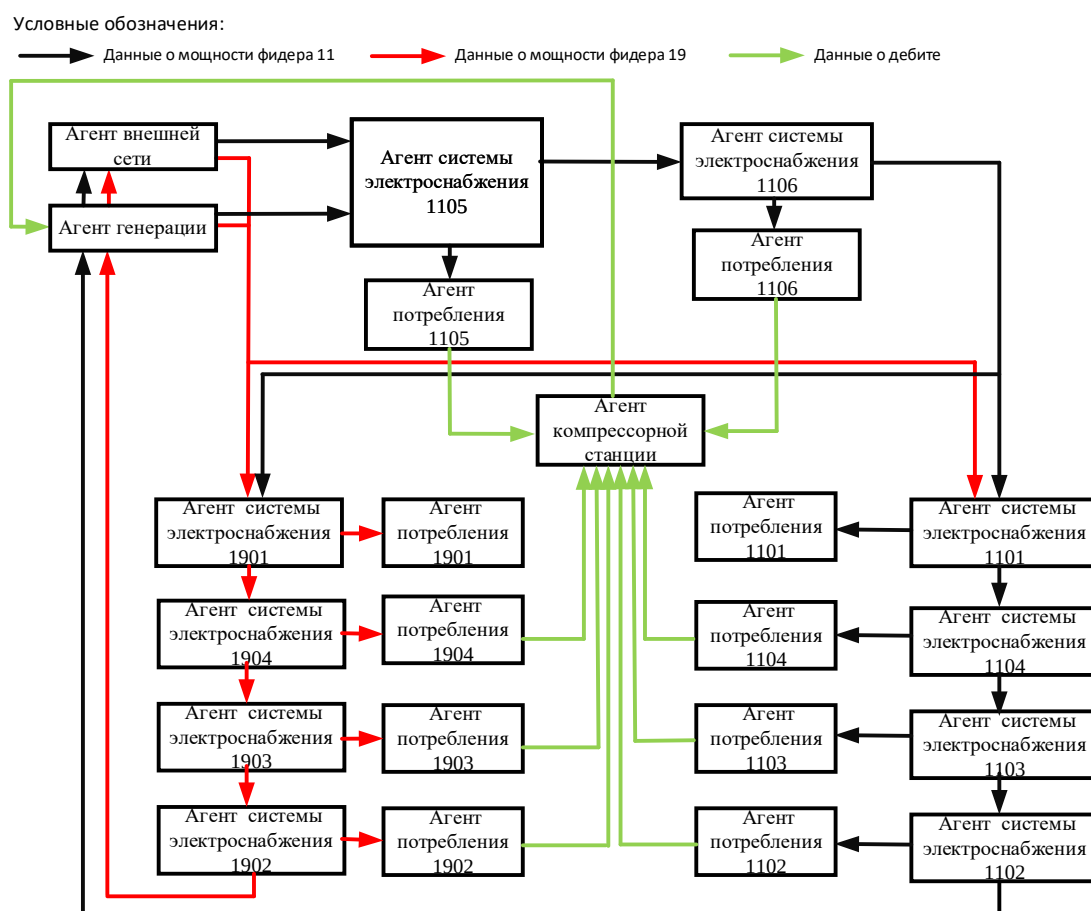


Рисунок 4.14 – Структурная схема мультиагентной модели ЭТК Южного купола Юрчукского месторождения

Каждому агенту СЭС на схеме соответствует реальный энергетический объект – КТП, каждому агенту потребления соответствует совокупность объектов механизированной добычи нефти и газа, питающихся от определенной КТП.

Баланс мощности в электрической сети обеспечивается по двум фидерам. Информация о мощности, которую необходимо добавить в сеть собирается со всех агентов СЭС.

Нормальные электрические режимы фидеров сведены в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Нормальные электрические режимы мультиагентной модели ЭТК Южного купола Юрчукского месторождения

Режим	Контур агентов
Нормальный ф11	Агент генерации – Агент внешней сети – Агент СЭС 1105 – Агент СЭС 1106 – Агент СЭС 1101 – Агент СЭС 1104 – Агент СЭС 1103 – Агент СЭС 1102
Нормальный ф19	Агент генерации – Агент внешней сети – Агент СЭС 1901 – Агент СЭС 1904 – Агент СЭС 1903 – Агент СЭС 1902.

Агенты СЭС собирают информацию о необходимой мощности для питания нагрузки и сообщают её агенту генерации. Агент генерации передает информацию агенту внешней сети о мощности, которую он способен поставить в сеть, агент внешней сети в ответ сообщает о мощности, которую он поставляет в сеть, чтоб покрыть запрос всех агентов СЭС.

Агенты СЭС 1101 и 1901 являются взаимозаменяемыми, так как соответствующие им реальные энергетические объекты – КТП 1101 и 1901 оснащены системой АВР.

Агент компрессорной станции собирает информацию о имеющемся дебите ПНГ со всего месторождения и передает её агенту генерации, агент генерации в ответ сообщает о расходе топлива для обеспечения текущего

электрического режима. Излишки ПНГ распределяются по транспортной системе на дальнейшую переработку.

Цель среды взаимодействия мультиагентной модели в данном случае контролировать необходимый поток ПНГ для обеспечения электроэнергией объекты механизированной добычи и обеспечивать баланс мощности в электрической сети.

Изменение технологического режима, в соответствии с технологическими регламентами, описывается дискретным процессом с периодами временных интервалов в 1 час, при этом быстрой динамикой регуляторов системы электроснабжения можно пренебречь.

Баланс мощности ЭТК заключается в регулировании потоков мощности с помощью сценариев перехода между электрическими режимами ЭТК, на основе которых контролируется мощность, подаваемая генераторами и (или) потребляемая нагрузкой. Сценарии учитывают потоки мощности, которую агенты генерации могли бы выдать в сеть, если бы отключенные агенты потребления продолжали добычу нефтегазовой смеси, впоследствии преобразующейся в топливо для ГТУ.

Модель принятия решения состоит из множества состояний системы, множества доступных действий (сценариев) и множества, соответствующих сценариям, «штрафов». Этот метод подразумевает поведение агента, благодаря которому он из различных действий в виртуальной среде выбирает такое, чтобы минимизировать штрафной сигнал и принести наиболее эффективный результат.

На Южном куполе Юрчукского месторождения общий эксплуатационный фонд составляет 20 нефтегазодобывающих скважин, все они эксплуатируются при помощи электроцентробежных насосов. Предполагаемые 8 микротурбин мощностью 200 кВт и параметром потребления топлива – 71,4 м³/ч, при непрерывном режиме работы потребляют 571,2 м³/ч.

Анализ электропотребления и добычи нефти и газа в 2016 и 2018 годах представлен в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Анализ электропотребления и добычи нефти и газа на Южном куполе Юрчукского месторождения в 2016 и 2018 годах

№ Куста	№ КТП	№ Скважины	Газовый фактор, F_d , о.е. $\sum_{i=1}^j G_i = \sum_{d=1}^q F_d \cdot Q_d$	Потребляемая мощность, кВА $\sum_{d=1}^f S_d^H$		Добыча жидкости, м ³ /ч		Добыча попутного нефтяного газа, м ³ /ч	
				2016 г.	2018 г.	2016 г.	2018 г.	2016 г.	2018 г.
29	1102	778	56,4	78	90	1,88	2,25	105,75	126,90
		779	98,8	78	90	1,00	1,02	98,80	100,86
		785	56,4	62	70	2,04	1,81	115,15	102,23
	1103	772	56,4	71	80	0,17	0,08	9,40	4,23
		780	98,8	80	90	1,54	1,08	152,32	107,03
		786	98,8	71	80	0,50	0,48	49,40	47,34
	1104	766	56,4	71	81	1,88	2,71	105,75	152,75
		773	56,4	75	82	2,08	3,08	117,50	173,90
		798	56,4	75	84	2,83	3,00	159,80	169,20
30	1105	761	56,4	80	90	0,17	0,18	9,40	10,11
		767	56,4	80	90	0,29	0,31	16,45	17,63
32	1106	1P	98,8	62	70	3,79	4,33	374,62	428,13
		2P	98,8	62	70	1,25	1,79	123,50	177,02
31	1902	775	56,4	49	54	1,04	0,96	58,75	54,05
		776	56,4	49	54	1,04	0,92	58,75	51,70
		781	98,8	124	142	0,83	0,42	82,33	41,17
	1903	762	56,4	107	119	2,08	1,83	117,50	103,40
		774	56,4	58	63	1,04	0,96	58,75	54,05
		796	56,4	58	65	1,83	0,88	103,40	49,35
	1904	763	56,4	160	182	1,75	0,54	98,70	30,55
Итого:				1550	1746	29,04	28,63	2016,0	2001,5

Изменение потока данных о добыче ПНГ при изменении технологических режимов добычи в 2016-2018 годах представлено на рисунке 4.15.

Сценарии перехода смоделированы в программном пакете *RastrWin3*, а процесс принятия решений в программном пакете *LabView*, описание состояний системы и сценариев перехода между ними представлены в таблицах 4.3 и 4.4.

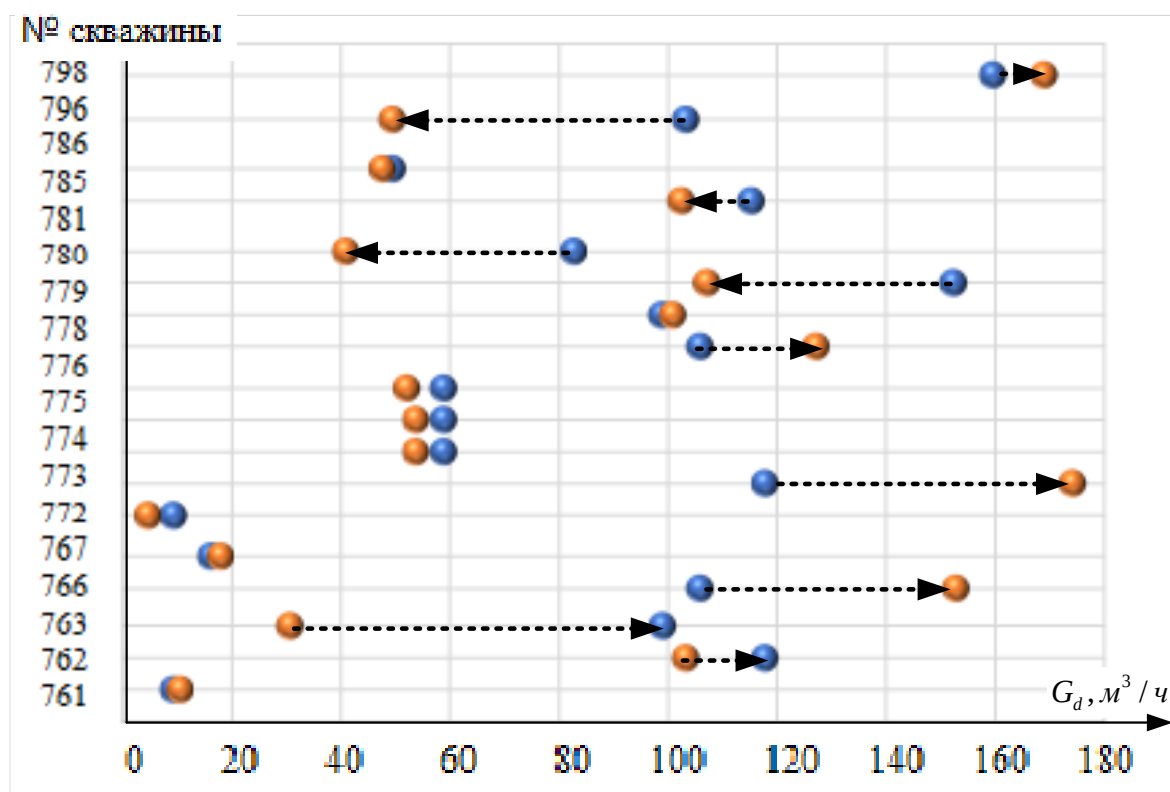


Рисунок 4.15 – Изменение потока данных о добыче ПНГ при изменении технологических режимов в период 2016-2018 гг.

Таблица 4.3 – Состояния агентов генерации

№ состояния	Мощность подстанции, S^g , кВА	Мощность турбин, $\sum_{i=1}^k S_i^G$, кВА	Мощность технологических объектов, $\sum_{d=1}^b S_d^H$, кВа	Расход топлива, G_d , $\text{м}^3/\text{ч}$	Транспорт топлива на переработку, $\text{м}^3/\text{ч}$
0	2500	0	2500	2016	1444,8
1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8	2300 - 900	200 - 1600	2500	2016	1444,8
9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17	2500	0	2500	2002	1430,8

Состояния 0 – состояние, при котором микротурбины не работают; состояния 1-8 означают количество работающих микротурбин; состояния 9-17 аналогичны состояниям 1- 8 по количеству работающих турбин, но соответствует более позднему моменту времени, при котором возможны изменения технологического или электрического режимов в результате изменения технологического регламента или процессов старения электрооборудования и, соответственно, увеличению потерь электроэнергии.

Таблица 4.4 – Сценарии перехода между состояниями и соответствующие им параметры

№ сценария		Отклонение напряжение δU , %	Отклонение частоты Δf , Гц	Примечание
0-1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6, 6-7, 7-8		0,23	0,16	Сценарии включения/ отключения 1 турбины газотурбинной электростанции и 1 КТП месторождения
0-2, 1-3, 2-4, 3-5, 4-6, 5-7, 6-8		0,43	0,28	Сценарии включения/ отключения 2 турбин и 2 КТП
0-9, 1-10, 2-11, 3-12, 4-13, 5-14, 6-15, 7-16, 8-17	Без учета старения	0,70	0,65	Сгенерированы новые сценарии, учитывающие старение электрооборудования и изменение режима добычи
	С учетом старения	0,56	0,38	

Марковский процесс принятия решений, связанных с работой агентов генерации, изображен на рисунке 4.16.

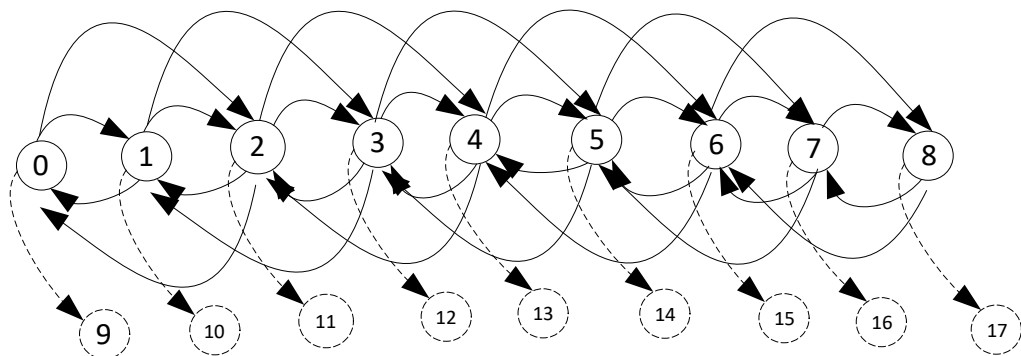


Рисунок 4.16 –Марковский процесс принятия решений, связанных с работой агента генерации

В процессе создания мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ, согласно мультиагентному подходу, необходимым условием является динамическое формирование пространства состояний на основе наблюдений реального физического объекта, именно в процессе исследования такой среды управляющие воздействия агентов наиболее эффективны.

Управление сетью заключается в решении проблем перегрузки и регулирования напряжения с помощью сценариев, на основе которых

контролируется мощность, подаваемая генераторами и (или) потребляемая нагрузкой, чтобы избежать перегрузок или недопустимых отклонений показателей качества электроэнергии. На рисунке 4.17 изображен фрагмент пользовательского интерфейса агента генерации в среде *LabView*.

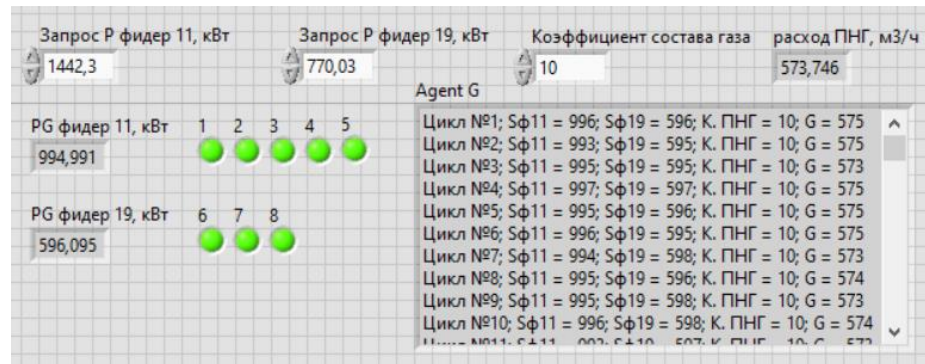


Рисунок 4.17 – Фрагмент пользовательского интерфейса агента генерации в среде *LabView*

Переходы между сценариями в целом описывается как марковский процесс принятия решений, где динамика системы описывает изменения режима электрической сети, в то время как пространство действий охватывает управляющие воздействия, доступные мультиагентной модели.

4.2 Физическое моделирование ЭТК НГДП с объектами РГ на лабораторных стендах

Физическое моделирование позволяет оценить свойства объекта без составления сложного математического описания, при этом не пренебрегая реальными физическими процессами, происходящими в оборудовании [62].

При помощи физической модели ЭТК НГДП с объектами РГ были проведены следующие эксперименты:

- Оценка погрешности разработанной методики обеспечения баланса мощности в электрической сети НГДП;
- Оценка погрешности моделирования управляющих воздействий цифровой мультиагентной модели на реальном физическом объекте;
- Оценка погрешности расчета электрической мощности, исходя из теплопроизводительности ПНГ, при отработке методики обеспечения баланса мощности в электрической сети НГДП.

Данные опыты были осуществлены на разных лабораторных стендах для учета лишь необходимых факторов и взаимосвязей во избежание громоздкости модели.

Оценка погрешности разработанной методики обеспечения баланса мощности в электрической сети НГДП с объектами РГ

На лабораторном стенде выполнена оценка погрешности предложенной методики обеспечения баланса мощности в электрической сети НГДП с объектами РГ, а также апробирован подход к построению модели мультиагентной модели ЭТК. В качестве оборудования выбрана лабораторная база кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации» ФГАОУ ВО ПНИПУ.

Паспортные данные асинхронного электродвигателя и синхронного генератора, используемых в качестве объектов генерации приведены в таблицах 4.5 и 4.6 соответственно.

Таблица 4.5 – Паспортные данные асинхронного двигателя

Наименование параметра	Значение
Модель	АИР80В42У3
Ротор	Короткозамкнутый
Номинальная мощность, Вт	1500
Номинальное напряжение питания обмотки статора, Y/Δ, В	3х380
Номинальный ток статора, Y/Δ, А	3,6
Номинальная частота вращения, об/мин	1400
$\cos \varphi$	0,84
КПД, %	78,5

Таблица 4.6 – Паспортные данные синхронного генератора

Наименование параметра	Значение
Номинальная мощность, ВА	1500
Номинальное напряжение, В	380
Номинальный ток статора, А	2
Номинальная частота вращения, об/мин	1500
$\cos \varphi$	0,8
КПД, %	74
Номинальный ток возбуждения, А	5
Номинальное напряжение возбуждения, В	7

В качестве агентов потребления использовалась нагрузка:

- двигательная (две машины переменного тока 120 Вт и 220 Вт / 380 В / 1500 об/мин);
- активная (блок сопротивления с переключателем на 270 Ом, 360 Ом, 550 Ом и 1100 Ом).

В качестве агентов СЭС использовались модуль «Электрические машины» и блок активной нагрузки с клеммами подключения сопротивлений.

Погрешности измерений измерителя мощности, установленного в модуле «Электрические машины», представлены в Приложении В.

Внешний вид лабораторного стенда представлен на рисунке 4.18.

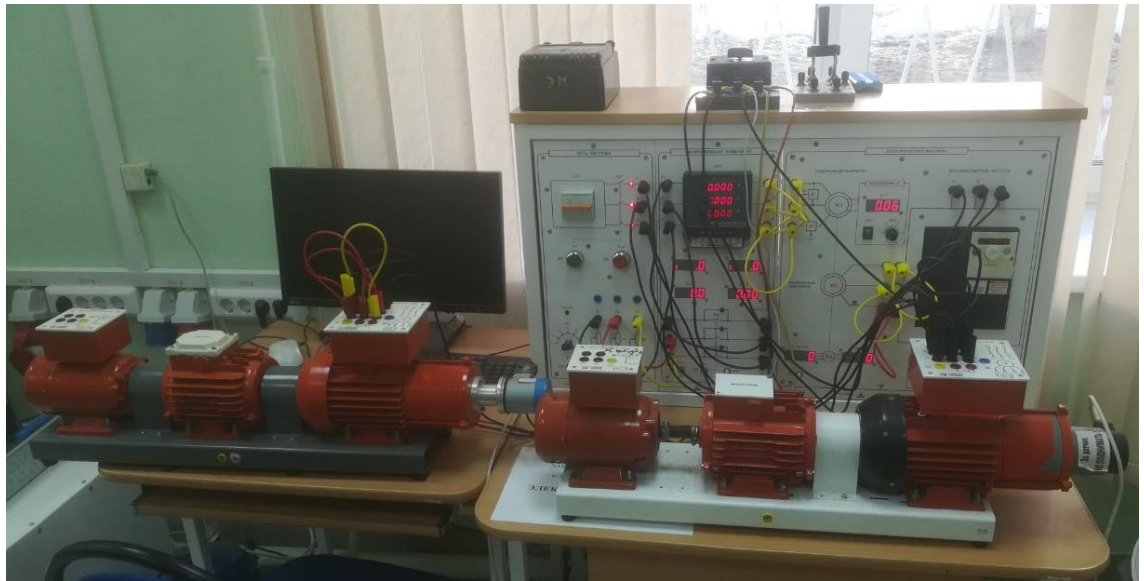


Рисунок 4.18 – Внешний вид лабораторного стенда

Структурная схема лабораторного стенда изображена на рисунке 4.19.

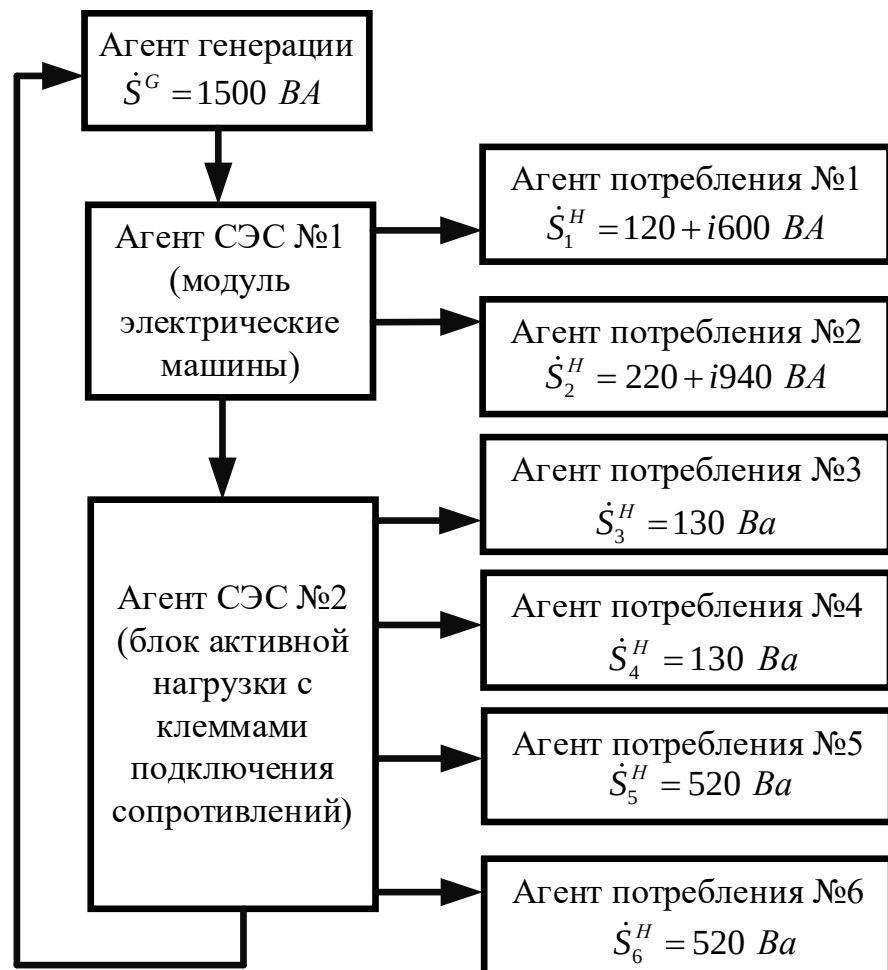


Рисунок 4.19 – Структурная схема лабораторного стенда

Уравнение баланса мощности в электрической сети лабораторного стенда, соответствующее структурной схеме мультиагентной модели:

$$\dot{S}^G = \dot{S}_1^H + \dot{S}_2^H + \dot{S}_3^H + \dot{S}_4^H + \dot{S}_5^H + \dot{S}_6^H \quad (61)$$

Агенты СЭС, представленные модулем «Электрические машины» и блок активной нагрузки с клеммами подключения сопротивлений обладают пренебрежительно малыми параметрами для влияния на баланс мощности и поэтому не используются в уравнении баланса мощности.

Агент внешней сети представлен в лабораторной модели асинхронным двигателем, подключенным к внешней сети, и синхронным генератором, которые расположены на одном валу. Агент внешней сети может выдавать мощность в сеть лабораторного стенда до 1500 кВА, выдаваемая мощность регулируется током возбуждения синхронного генератора.

Агенты потребления, представленные двигательной нагрузкой, в лабораторной модели соответствуют объектам технологического процесса добычи нефти и газа. Агенты потребления, представленные активной нагрузкой, соответствуют объектам механизированной добычи нефти и газа.

Опыты проводились для определения потребляемой мощности агентов потребления в разных сценариях работы мультиагентной модели. Сначала моделировались все возможные установившиеся электрические режимы, а затем моделировались сценарии подключения и отключения нагрузки с последующим изменением выдаваемой в сеть мощности агентом генерации. Также фиксировались изменения показателей качества электроэнергии в сети и параметров агента генерации. Напряжение в сети должно находиться в диапазоне 361 – 399 В, параметры агента генерации не должны превышать паспортные значения оборудования: ток возбуждения синхронного генератора не должен превышать 2 А, ток статора асинхронного двигателя – 8 А.

Результаты моделирования электрических режимов с двигательной нагрузкой на лабораторном стенде сведены в таблицу 4.7.

Таблица 4.7 – Результаты моделирования электрических режимов с двигательной нагрузкой на лабораторном стенде

Режим	$I_{\text{возб}}, \text{A}$	$U, \text{В}$	$\Delta U, \text{В}$	$I_{\text{статор}}, \text{A}$	$\dot{S}^H, \text{ВА}$	$S^H, \text{ВА}$	Оценка режима
0	3,36	380	0	0	0	0	Допустимо
1	5,83	380	0	0,98	$120+i613$	625	Допустимо
2	6,82	380	0	1,48	$220+i940$	965	Допустимо
3	7,31	338	42	1,98	$244+i1098$	1125	Недопустимо

Обозначения режимов с двигательной нагрузкой: режим 0 – нагрузка отсутствует; режим 1 – к сети подключен двигатель №1; режим 2 – к сети подключен двигатель №2; режим 3 – подключены оба двигателя.

Результаты моделирования сценариев перехода из одного режима с двигательной нагрузкой в другой сведены в таблицу 4.8.

Таблица 4.8 – Результаты моделирования сценариев подключения двигательной нагрузки на лабораторном стенде

Результаты физического моделирования									Результаты оценки	
Сценарий	Исходный режим	Конечный режим	$I_{\text{возб}}, \text{A}$	$U, \text{В}$	$\Delta U, \text{В}$	$I_{\text{статор}}, \text{A}$	$\dot{S}^H, \text{ВА}$	$S^H, \text{ВА}$	$\Delta S, \text{ВА}$	Оценка сценария
1	0	1	3,36	274	106	0,56	$65+i245$	253	-372	Недопустимо
2	0	2	3,33	234	146	0,77	$82+i298$	309	-656	Недопустимо
3	1	0	5,61	480	100	0	0	0	+625	Недопустимо
4	2	0	6,82	510	130	0	0	0	+965	Недопустимо

Оценка «недопустимо» означает, что режим не соответствует необходимым параметрам сети и/или превышает паспортные номинальные значения электрооборудования, соответствующего агенту генерации.

Результаты показывают, что в процессе функционирования моделируемой сети невозможно отключать или включать двигательную нагрузку без превышения границ диапазона нормальных параметров сети. Следующие сценарии будут учитывать непрерывную работу одного из двигателей, соответствующего объектам технологического процесса добычи нефти и газа.

Результаты моделирования электрических режимов с активной нагрузкой на лабораторном стенде сведены в таблицу 4.9.

Результаты моделирования сценариев перехода из одного режима с активной нагрузкой в другой сведены в таблицу 4.10.

Таблица 4.9 – Результаты моделирования электрических режимов с активной нагрузки на лабораторном стенде

Режим	$I_{\text{возб}}, \text{A}$	$U, \text{В}$	$\Delta U, \text{В}$	$I_{\text{статор}}, \text{A}$	$\dot{S}^H, \text{ВА}$	$S^H, \text{ВА}$	Оценка режима
0	3,36	382	2	0	0	0	Допустимо
1	3,46	380	0	0,20	$131+i14$	132	Допустимо
2	3,59	380	0	0,39	$257+i14$	257	Допустимо
3	4,55	380	0	1,19	$779+i14$	779	Допустимо
4	5,27	337	43	1,99	$1154+i15$	1154	Недопустимо

Таблица 4.10 – Результаты моделирования сценариев подключения активной нагрузки на лабораторном стенде

Результаты физического моделирования									Результаты оценки	
Сценарий	Исходный режим	Конечный режим	$I_{\text{возб}}, \text{A}$	$U, \text{В}$	$\Delta U, \text{В}$	$I_{\text{статор}}, \text{A}$	$\dot{S}^H, \text{ВА}$	$S^H, \text{ВА}$	$\Delta S, \text{ВА}$	Оценка сценария
1	0	1	3,38	374	6	0,20	$128+i14$	129	-3	Допустимо
2	0	2	3,38	365	15	0,41	$236+i14$	236	-11	Допустимо
3	1	2	3,46	372	8	0,39	$247+i14$	247	-10	Допустимо
4	1	0	3,46	388	8	0	0	0	+132	Допустимо
5	2	1	3,59	387	7	0,21	$137+i17$	138	+6	Допустимо
6	2	0	3,59	392	12	0	0	0	+257	Допустимо
7	2	3	3,59	332	48	1,05	$597+i12$	597	-182	Недопустимо
8	3	2	4,55	428	48	0,23	$169+i17$	170	+38	Недопустимо
9	3	1	4,55	420	40	0,433	$319+i17$	320	+63	Недопустимо

Обозначение режимов с активной нагрузкой:

- режим 1 – нагрузка №1 сопротивлением 1100 Ом;
- режим 2 – нагрузка №2 сопротивлением 550 Ом;
- режим 3 – нагрузка №3 сопротивлением 360 Ом;
- режим 4 – нагрузка №4 сопротивлением 270 Ом.

При моделировании режимов со смешанной нагрузкой номер режима состоит из двух частей, разделенных точкой – первое число означает режим подключенной двигательной нагрузки, второе – режим подключенной

активной нагрузки. Результаты моделирования электрических режимов с активной и двигательной нагрузкой на лабораторном стенде сведены в таблицу 4.11. Сравнение результатов моделирования режимов с активной и двигательной нагрузкой, полученных на лабораторном стенде и рассчитанных в мультиагентной модели представлено в таблице 4.12.

Таблица 4.11 – Результаты моделирования электрических режимов с активной и двигательной нагрузкой на лабораторном стенде

Режим	$I_{\text{возб}}, \text{A}$	U, B	$\Delta U, \text{B}$	$I_{\text{статор}}, \text{A}$	$\dot{S}^H, \text{BA}$	S^H, BA	Оценка режима
1.1	5,95	380	0	1,091	257+i656	704	Допустимо
1.2	6,12	380	0	1,186	384+i661	764	Допустимо
1.3	7,16	380	0	1,761	911+i692	1144	Допустимо
2.1	7,11	380	0	1,542	359+i937	1003	Допустимо
2.2	7,37	380	0	1,644	497+i954	1075	Допустимо

Таблица 4.12 – Сравнение результатов моделирования режимов с активной и двигательной нагрузкой

Режим	Физическая модель, $\dot{S}^H, \text{BA}$	Мультиагентная модель, $\dot{S}^H, \text{BA}$	Погрешность, $P^H, \%$	Погрешность, $jQ^H, \%$
1.1	257+j651	251+j627	2,33	3,67
1.2	384+j656	377+j627	1,82	4,42
1.3	911+j659	899+j627	1,32	4,86
2.1	359+j937	351+j954	2,23	1,78
2.2	497+j954	477+j954	4,02	0,01

Погрешность результатов моделирования установившихся электрических режимов, смоделированных в мультиагентной модели, не превышает 4,86%.

Результаты моделирования сценариев перехода из одного режима с активной и двигательной нагрузкой в другой сведены в таблицу 4.13.

Сравнение результатов моделирования сценариев перехода с активной и двигательной нагрузкой, полученных на лабораторном стенде и рассчитанных при помощи мультиагентной модели представлено в таблице 4.14.

Таблица 4.13 – Результаты моделирования сценариев перехода с активной и двигательной нагрузкой

Результаты физического моделирования									Результаты оценки	
Сценарий	Исходный режим	Конечный режим	$I_{\text{возб}}, \text{A}$	$U, \text{В}$	$\Delta U, \text{В}$	$I_{\text{статор}}, \text{A}$	$\dot{S}^H, \text{ВА}$	$S^H, \text{ВА}$	$\Delta S, \text{ВА}$	Оценка сценария
10	1.0	1.1	5,8	375	5	1,056	245+i622	668	-36	Допустимо
11	1.0	1.2	5,8	371	9	1,146	357+i628	722	-41	Допустимо
12	1.1	1.2	5,95	375	5	1,158	375+i636	738	-26	Допустимо
13	1.1	1.3	5,95	324	56	1,675	813+i567	991	-153	Недопустимо
14	1.2	1.3	6,12	356	24	1,578	848+i572	1019	-125	Недопустимо
15	1.2	1.0	6,12	395	15	1,090	163+i629	650	+25	Допустимо
16	1.2	1.1	6,10	384	4	1,118	254+i678	727	+23	Допустимо
17	2.0	2.1	6,82	374	6	1,508	344+i904	967	-36	Допустимо
18	2.0	2.2	7,02	369	11	1,555	457+i903	1012	-63	Допустимо
19	2.1	2.2	7,11	375	5	1,595	476+i912	1028	-47	Допустимо
20	2.1	2.0	7,11	385	5	1,511	249+i946	978	+13	Допустимо
21	2.2	2.0	7,37	389	9	1,502	256+ i948	982	+17	Допустимо
22	2.2	2.1	7,37	385	5	1,508	463+ i915	1025	+22	Допустимо

Таблица 4.14 – Сравнение результатов моделирования сценариев перехода с активной и двигательной нагрузкой

Сценарий	Исходный режим	Конечный режим	Физическая модель, $\dot{S}^H, \text{ВА}$	Мультиагентная модель $\dot{S}^H, \text{ВА}$	Погрешность $P^H, \%$	Погрешность $jQ^H, \%$
1	1.0	1.1	245+j622	232+j609	5,20	2,05
2	1.0	1.2	357+j628	343+j613	4,06	2,31
3	1.1	1.2	375+j636	365+j626	2,45	1,45
4	1.1	1.3	813+j567	768+j537	5,54	5,29
5	1.2	1.3	848+j572	803+j524	5,21	5,24
6	1.2	1.0	163+j629	171+j637	4,95	1,33
7	1.2	1.1	254+j678	262+j686	3,10	1,19
8	2.0	2.1	344+j904	331+j891	3,70	1,41
9	2.0	2.2	457+j903	434+j880	4,87	2,47
10	2.1	2.2	476+j912	459+j895	3,49	1,82
11	2.1	2.0	249+j946	253+j950	1,81	0,48
12	2.2	2.0	256+j948	262+j954	2,29	0,63
13	2.2	2.1	463+j915	470+j922	1,65	0,84

Погрешность результатов моделирования сценариев, смоделированных в мультиагентной модели, не превышает 5,29%.

Предложенная методика обеспечения баланса мощности вместе с предложенным подходом к построению мультиагентной модели ЭТК позволяет поддерживать баланс мощности в электрической сети НГДП с объектами РГ.

Оценка погрешности предложенного способа моделирования управляющих воздействий

На лабораторном стенде выполнена оценка погрешности предложенного способа моделирования управляющего воздействия в мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ, а также апробирован подход к построению модели мультиагентной модели ЭТК.

В качестве оборудования выбрана лабораторная база кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации» ФГАОУ ВО ПНИПУ.

На базе стенда «Модель электрической системы» была собрана система на одном валу «Синхронный генератор – Машина переменного тока».

В рамках моделирования ЭТК НГДП с объектами РГ синхронный генератор соответствует агенту генерации, который может работать параллельно с сетью, а машина переменного тока соответствует микротурбине.

Идея эксперимента заключается в том, чтоб перевести источник питания двигателя постоянного тока и возбудитель синхронной машины в автоматический режим управления, соединить с платой сбора информации *National Instruments USB-6009*, а затем используя методику по обеспечению баланса мощности и мультиагентную модель в программной среде *LabView* осуществить подключение синхронного генератора к сети, снятие его угловой характеристики и моделировании управляющих воздействий для поддержания необходимого коэффициента мощности. Паспортные данные стенда «Модель электрической системы», используемого в качестве модели ЭТК НГДП с объектами РГ приведены в таблице 4.15.

Погрешности измерений блока измерительных трансформаторов БИТ-3, установленного на лабораторном стенде «Модель электрической системы», представлены в Приложении В.

Таблица 4.15 Перечень аппаратуры стенда «Модель электрической системы»

Наименование	Параметры
Трехфазная трансформаторная группа	3 х 80 В·А; 230 (звезда) / 242, 235, 230, 126, 220, 133, 127 В
Модель линии электропередачи	400 В ~; 3 × 0,5 А
Трехфазная трансформаторная группа	3 х 80 В·А; 242, 235, 230, 126, 220, 133, 127 / 230 В (треугольник)
Блок синхронизации	400 В ~; 10 А 3 индикаторные лампы; синхроскоп
Блок измерительных трансформаторов тока и напряжения	600 В / 3 В (тр-р напряж.) 0,3 А / 3 В (тр-р тока)
Коннектор	8 аналог. диф. входов; 2 аналог. выхода; 8 цифр. входов/выходов
Плата сбора информации	<i>National Instruments USB-6009</i>
Трехполюсный выключатель	400 В ~; 10 А
Терминал	6 розеток с 8 контактами; 6×8 гнезд
Трехфазный источник питания	400 В ~; 16 А
Источник питания двигателя постоянного тока	Цепь якоря 0...250 В –; 3 А Цепь возбуждения 200 В –; 1 А
Возбудитель синхронной машины	0...40 В –; 3,5 А
Машина переменного тока	100 Вт / ~ 230 В / 1500 мин ⁻¹
Преобразователь угловых перемещений	6 вых. каналов / 2500 импульсов за оборот
Машина постоянного тока	90 Вт / 220 В / 0,56 А (якорь) / 2×110 В / 0,25 А (возб.)
Указатель частоты вращения	2000...0...2000 мин ⁻¹
Измеритель напряжений и частот	2 вольтметра 0...500 В ~ 2 частотомера 45...55 Гц; 220 В ~
Измеритель мощностей	15 - 600 В, 0,05-0,5 А.
Указатель угла нагрузки синхронной машины	-180°...0...180°

Внешний вид лабораторного стенда представлен на рисунке 4.20.

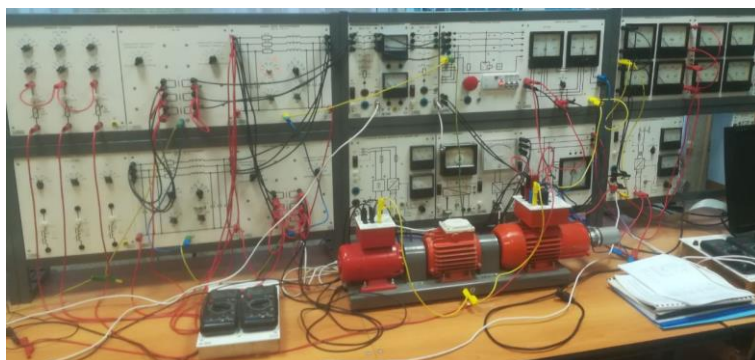


Рисунок 4.20 – Внешний вид лабораторного стенда «Модель электрической системы»

Внешний вид коннектора платы *National Instruments USB-6009* и ПК представлен на рисунке 4.21

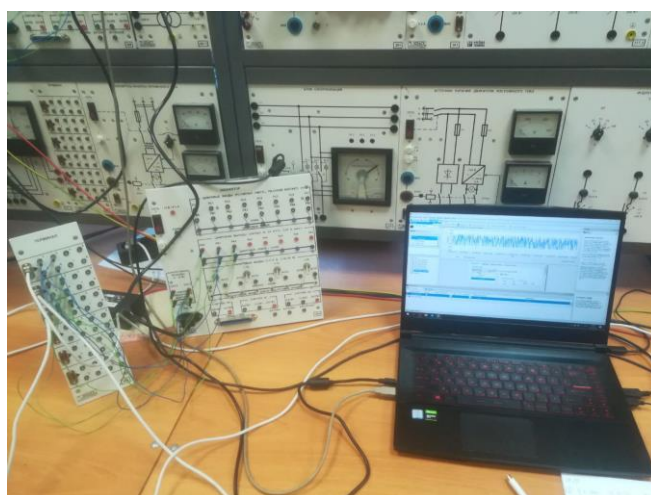


Рисунок 4.21 – Внешний вид коннектора платы *National Instruments USB-6009* и ПК

Структурная схема лабораторного стенда изображена на рисунке 4.22.

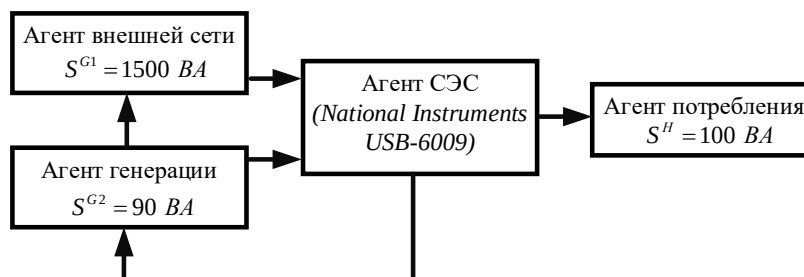


Рисунок 4.22 – Структурная схема лабораторного стенда

Уравнение баланса мощности в электрической сети лабораторного стенда, соответствующее структурной схеме мультиагентной модели:

$$\dot{S}^{G2} + \dot{S}^{G1} = \dot{S}^H \quad (62)$$

Если функции $\dot{S}^{G1}, \dot{S}^{G2}, \dot{S}^{H1}$ – непрерывные на всем пространстве E , пространстве всех возможных электрических режимов, тогда функции $A(\dot{S}^{G1}), A(\dot{S}^{G2}), A(\dot{S}^H)$ – это функции управляющих воздействий, которые необходимо смоделировать для обеспечения баланса мощности, обобщенная функция в этом случае:

$$F(\dot{S}, k) = \dot{S} + k \cdot A(\dot{S}), \quad (63)$$

где k – обозначает сценарий перехода из одного электрического режима в другой, а функция $A(\dot{S})$ определяет УВ агента мультиагентной модели.

В ходе опыта сначала было создано подключение синхронного генератора к сети постоянного напряжения и постоянной частоты на параллельную работу.

Затем проводились опыты для поддержания постоянного коэффициента мощности, путем регулирования реактивной мощности синхронного генератора. В структуре мультиагентной модели этот процесс соответствует процессу изменения потребляемой мощности агента потребления и последующему изменению мощности агента генерации, выдаваемой в моделируемую электрическую сеть. Эти процессы происходят через агента СЭС, представленного платой сбора информации *National Instruments USB-6009*, её аналоговые входы собирают информацию о токах и напряжении в сети, а аналоговые выходы способны генерировать управляющий сигнал 0-10 В для источника питания двигателя постоянного тока и возбудителя синхронной машины, работающих в автоматическом режиме.

Рисунок 4.23 иллюстрирует взаимодействие лабораторного стенда и мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ.

Такой подход обеспечивает многоуровневость верификации. На уровень распределения и обработки информации возлагается и задача обеспечения баланса мощности в системе электроснабжения с использованием мультиагентной модели, а также задача обеспечения селективности этой задачи с существующими задачами релейной защиты и автоматики.

Анализ результатов моделирования в ручном и автоматическом режиме модулей стенда «Модель электрической системы» при отработке сценария 1. представлены в таблице 6. Сценарий 1 предполагает снижение напряжения в сети со 170 В до 160 В в течение 5 секунд, а затем восстановление напряжения со 160 В до 170 В.

Таблица 6 – Анализ результатов моделирования в ручном и автоматическом режиме модулей стенда «Модель электрической системы» при отработке сценария 1.0.

Режим (сценарий)	Параметр	Время моделирования, с											
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Расчетный	Напряжение в сети, U , В	170,0	169,0	167,5	165,0	162,5	160,0	162,5	165,0	167,5	169,0	170,0	
Ручной	Напряжение в сети, $U_{\text{руч}}$, В	170,0	166,6	162,4	147,8	143,7	119,9	157,6	155,2	173,4	180,9	170,0	
	Погрешность, %	0,0	1,4	3,0	10,4	11,6	25,1	3,0	5,9	3,4	6,6	0,0	
Автомат.	Напряжение в сети, $U_{\text{авт}}$, В	170,0	168,8	165,4	162,3	161,8	159,6	156,8	158,9	167,9	172,8	170,0	
	Погрешность, %	0,0	0,1	1,3	1,6	0,4	0,3	3,5	3,7	0,2	2,2	0,0	

При имитации оперативного диспетчерского управления в системе отсутствуют все элементы, кроме источника питания двигателя постоянного тока и возбудителя синхронной машины, которые работают в ручном режиме – то есть во время опыта необходимо крутить ручку регулятора напряжения.

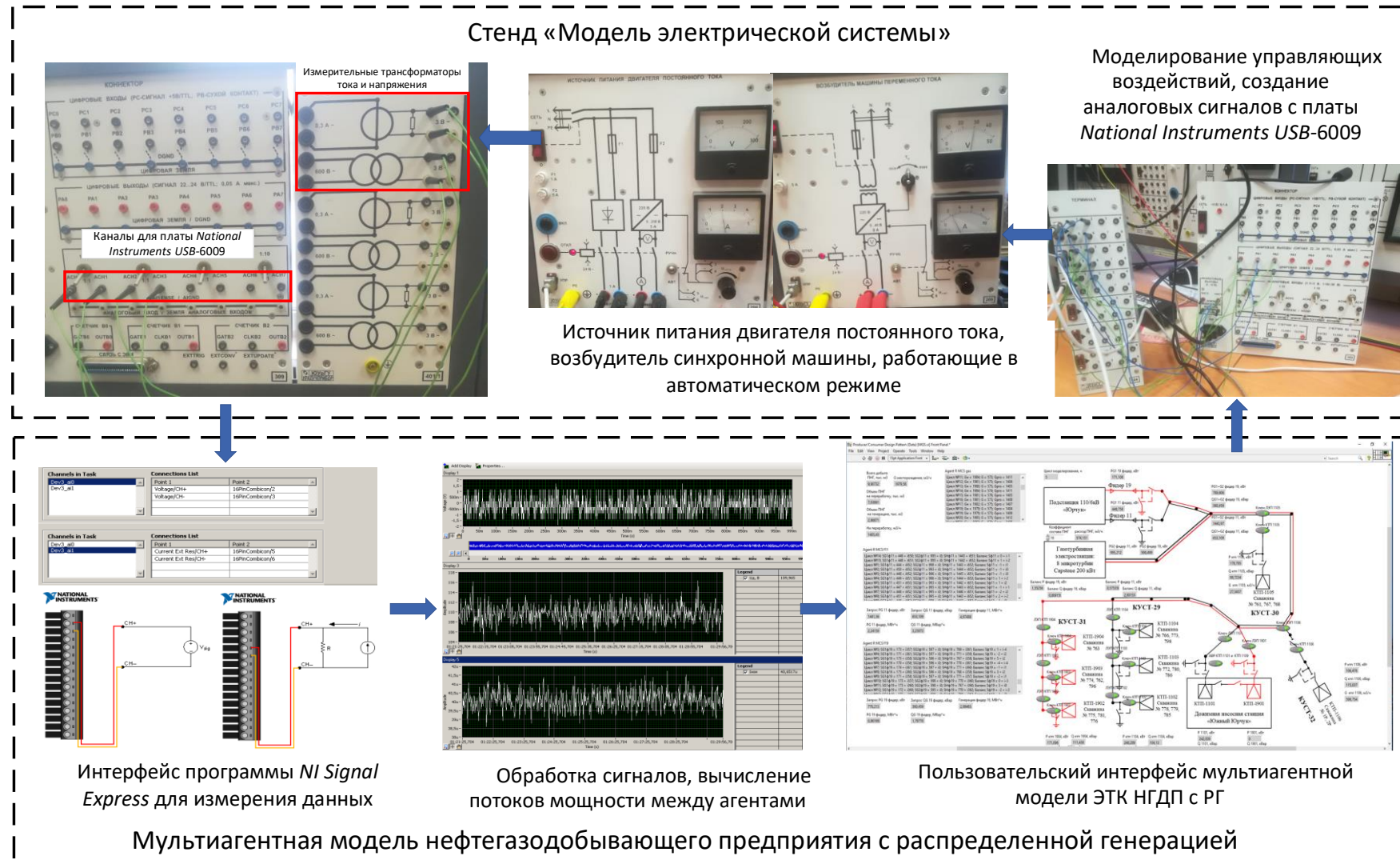


Рисунок 4.23 – Иллюстрация взаимодействия лабораторного стенда и мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами

На рисунке 4.24 изображено окно интерфейса программы *NI Signal Express* с результатами моделирования сценария временного снижения мощности агента потребления (снижение нагрузки) и результатами управляющего воздействия в ручном режиме.

После снижения мощности агента потребления прошло 5 секунд, прежде чем появилась возможность обеспечить баланс мощности в сети, соответствующий параметрам до сценария снижения нагрузки.

На рисунке 4.25 изображено окно интерфейса программы *NI Signal Express* с результатами моделирования сценария временного снижения мощности агента потребления и результатами управляющего воздействия в автоматическом режиме с применением мультиагентной модели.

Снижения мощности агента потребления прошло более плавно за счет создания аналогового сигнала управления с платы *National Instruments USB-6009*, а затем в течении 1 секунды вернулось к параметрам сети до снижения нагрузки. Погрешность по напряжению в сети не превышает 3,7%.

Моделирование управляющих воздействий имеет невысокую погрешность моделирования, был апробирован подход к построению мультиагентной модели ЭТК в рамках системы на одном валу «Синхронный генератор – Машина переменного тока».

Структурная схема предполагаемого взаимодействия мультиагентной модели с другими элементами реального ЭТК НГДП с объектами РГ показана на рисунке 4.26.

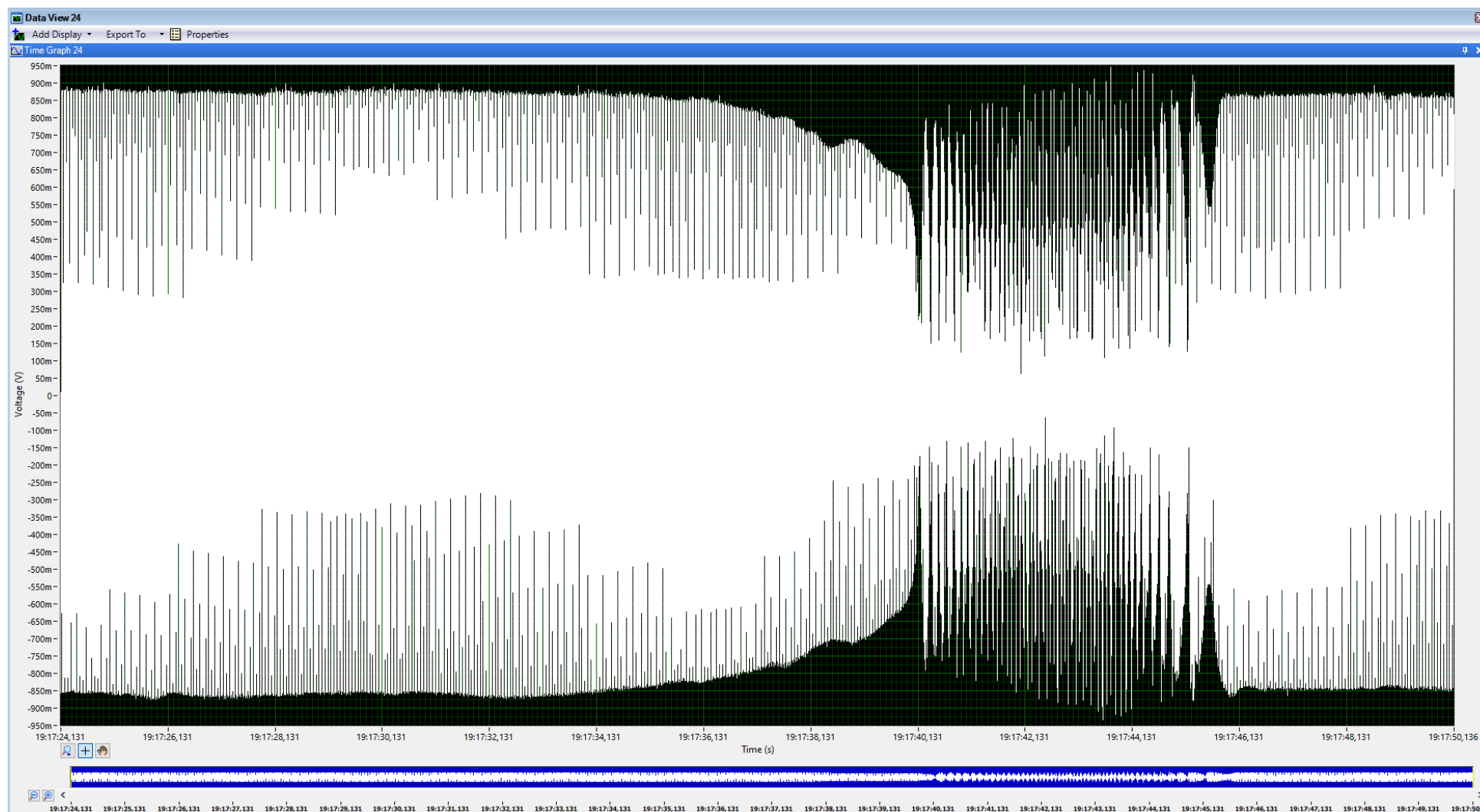


Рисунок 4.24 – Результаты моделирования с ручным управлением модулей стенда «Модель электрической системы»

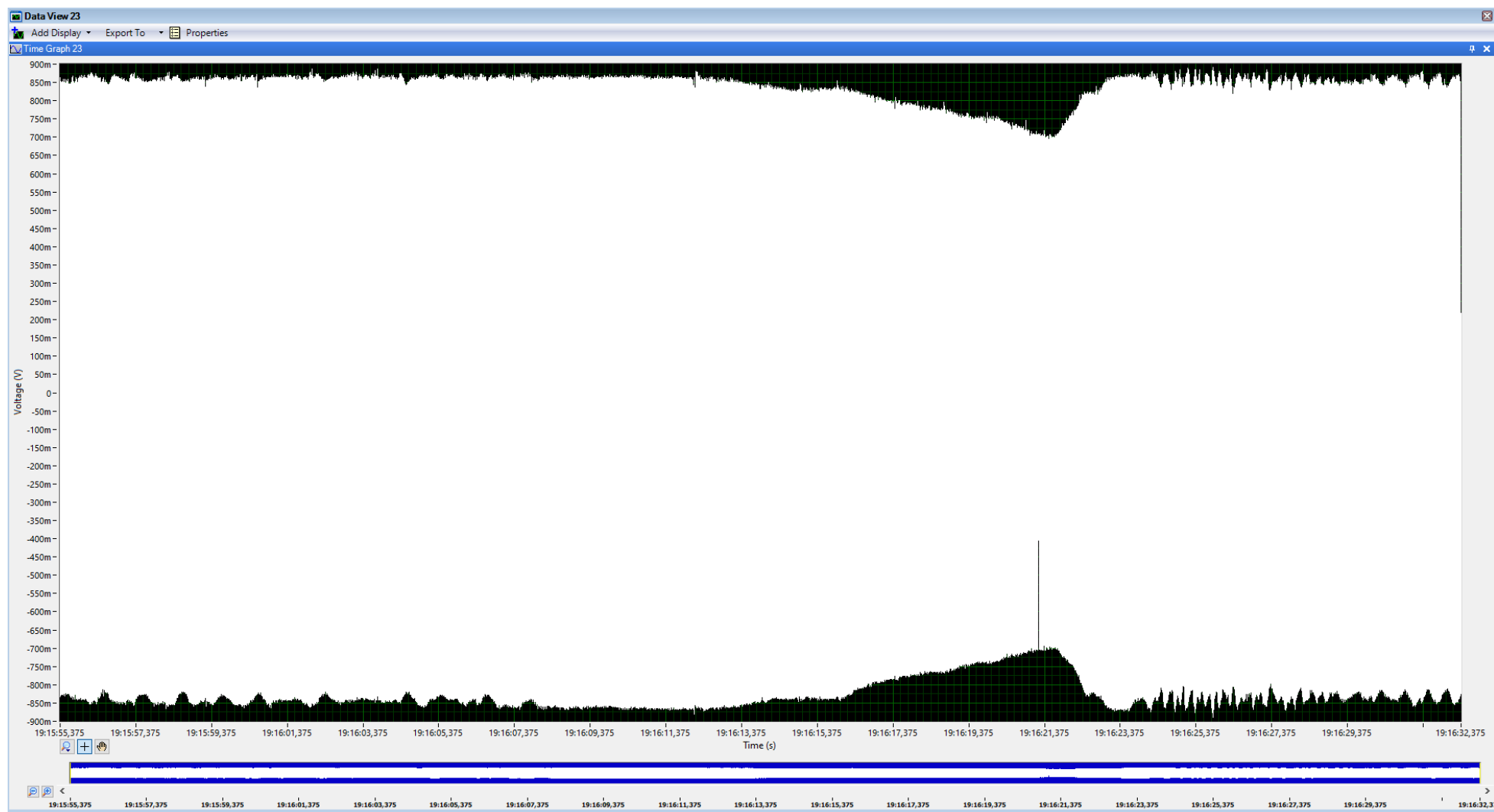


Рисунок 4.25 – Результаты моделирования с автоматическим управлением модулей стенда «Модель электрической системы»

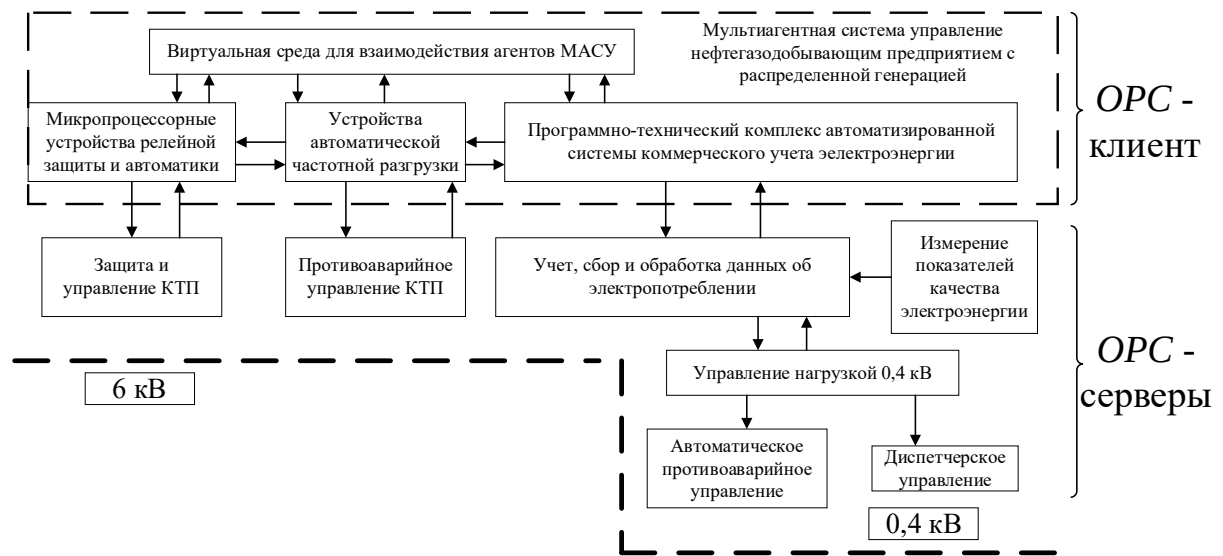


Рисунок 4.26 – Структурная схема взаимодействия мультиагентной модели с элементами ЭТК НГДП с объектами РГ

Набор стандартов *OPC* обеспечивает передачу данных от источника данных (*OPC*-сервера) к любому клиентскому приложению (*OPC*-клиент), что означает отсутствие необходимости для клиентского приложения иметь специфические сведения об источнике данных, такие как: внутренняя структура и протокол связи. Архитектура связей программно-технического комплекса для агентов генерации и агентов потребления реализована единообразно. Стандарт *OPC Data Access* не привязан к аппаратному обеспечению – он работает с элементами. Элемент представляет собой единственный элемент данных *OPC*-сервера, *OPC*-клиент собирает элементы с одинаковыми зонами нечувствительности и периодами обновления в группы, соответствующие множествам агентов мультиагентной модели.

Для аналоговых величин (параметров) изменением считается изменение величины, большее чем зона нечувствительности, установленная для группы. Для дискретных величин (изменение топологии электрической сети) изменением считается смена состояния по сравнению с последним обновлением.

Оценка погрешности расчета электрической мощности, исходя из теплопроизводительности ПНГ

На лабораторной установке выполнена оценка погрешности расчета электрической мощности, исходя из теплопроизводительности ПНГ, при отработке методики обеспечения баланса мощности в электрической сети НГДП. В качестве оборудования выбрана лабораторная база кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ФГАОУ ВО ПНИПУ. Внешний вид лабораторной установки представлен на рисунке 4.27.



Рисунок 4.27 – Внешний вид лабораторной установки по анализу сжигаемого газа

В качестве лабораторной установки используются компоненты газотурбинного двигателя 9И56 производства ПАО «Калужский двигатель».

В рамках методики обеспечения баланса мощности в электрической сети НГДП с объектами РГ вместо работы с электромеханическими параметрами ГТУ предлагается использовать методику конвертации параметров расхода топлива в электрическую мощность с учетом состава топлива. Паспортные данные газотурбинного двигателя 9И56 приведены в таблице 4.17.

Таблица 4.17 – Паспортные данные газотурбинного двигателя 9И56

Наименование параметра	Значение
Компрессор	Центробежный, одноступенчатый
Турбина	Осевая, одноступенчатая
Топливо	Дизельное, керосин, природный газ
Номинальная мощность, кВт	80
Температура на входе в турбину, °К	1188
Частота вращения выходного вала, об/мин	8000
КПД турбины, о.е.	0,88
Степени расширения турбины, о.е.	2,4
Масса, кг	150
Запыленность воздуха, г/м ³	До 2,5

Предлагается использовать методику оценки вырабатываемой мощности исходя из расхода и состава ПНГ, поступающего на объекты генерации. Состав ПНГ, взятого для проведения опыта с нефтегазосборного пункта №1045 «Ильичевка», представлен в таблице 4.18.

Таблица 4.18 – Состав ПНГ НГСП-1035 «Ильичевка»

Наименование компонента	Молярная доля, %	Объемная доля (перерасчет), %	Массовая доля (перерасчет), %	Плотность, кг/м ³
Метан, CH_4	70,56	70,69	52,82	0,660
Этан, C_2H_6	10,40	10,36	14,61	1,230
Пропан, C_3H_8	4,28	4,23	8,82	1,800
Изо-бутан, C_4H_{10}	1,79	1,75	4,86	2,380
Изо-пентан, C_5H_{12}	0,61	0,58	2,06	2,940
Гексаны, C_6H_{14}	0,2	0,19	0,81	3,520
Азот, N_2	11,79	11,83	15,44	2,860
Диоксид углерода, CO_2	0,21	0,21	0,43	4,490
Гелий, He	0,07	0,07	0,01	0,160
Сероводород, H_2S	0,09	0,09	0,14	1,390

Параметры ПНГ, необходимые для расчета мощности представлены в таблице 4.19.

Таблица 4.19 – Параметры ПНГ НГСП-1035 «Ильичевка»

Наименование параметра	Значение
Плотность ПНГ, кг/м ³	1,080
Стехиометрическое соотношение, о. е.	13,957
Показатель адиабаты продуктов сгорания ПНГ, о.е.	1,280
Теплопроизводительность ПНГ, кДж/кг	42990

Уравнение теплоёмкости ПНГ было вычислено с помощью многоцелевого программного комплекса, предназначенного для моделирования равновесных состояний и процессов в высокотемпературных системах с химическими и фазовыми превращениями «Астра 4», разработанного в МГТУ им. Баумана [117].

Расчеты состава фаз и характеристик равновесия проводились с использованием справочной базы данных по типовым свойствам веществ.

Уравнение теплоёмкости ПНГ, Дж/(кг·°K):

$$C_{p\text{ПНГ}} = 0,250 \cdot T_{\text{вхСТ}} + 943 \quad (64)$$

где $T_{\text{вхСТ}}$ – температура на входе в турбину, °K.

Результаты опыта по сжиганию газа в условиях работы реальной ГТУ нефтегазового месторождения представлены в таблице 4.20.

Таблица 4.20 – Результаты опыта по сжиганию газа в ГТУ

Номер опыта	Расход топлива G_T , л/мин	Расход воздуха G_B , л/мин	Коэффициент избытка воздуха α , о.е.	Температура на входе в турбину $T_{\text{вхСТ}}$, °K
1	17,178	261,337	1,27	737
2	28,630	262,606	0,76	1147
3	57,260	266,557	0,39	737

Зависимость температуры в камере сгорания от коэффициента избытка воздуха изображена на рисунке 4.28, на кривой отмечены 3 экспериментальные точки.

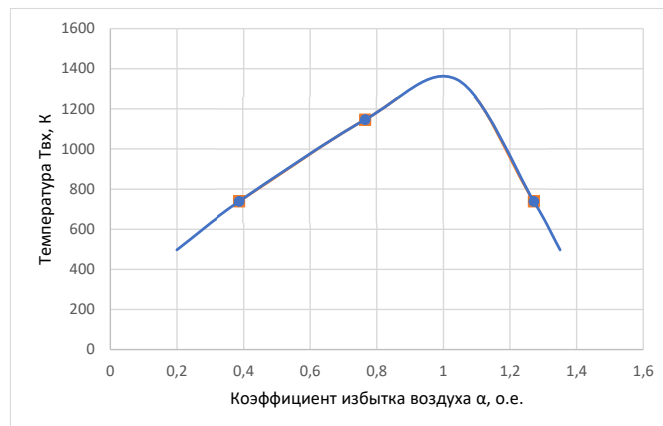


Рисунок 4.28 – График зависимости температуры в камере сгорания от коэффициента избытка воздуха

Согласно работе Мингазова Б. Г. [118] расчетным путем проверяются экспериментальные точки, соответствующие $\alpha \geq 1$:

$$T_{\text{вхКС}} = T_K + \frac{Hu \cdot \eta_{\text{КС}}}{c_p (1 + \alpha \cdot L_0)} \quad (65)$$

где T_K – температура на выходе из компрессора, °К,

Hu – теплопроизводительность газа, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$, $\eta_{\text{СТ}}$ – КПД камеры сгорания, о. е.,

c_p – теплоемкость газа, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{К}}$, L_0 – параметры камеры сгорания.

Произведен перерасчет расхода топлива и расхода воздуха для генерации 80 кВт электрической мощности (номинальных параметров ГТУ). Сравнение результатов расчета температуры и мощности с результатами экспериментальных замеров представлено в таблице 4.21.

Таблица 4.21 – Сравнение результатов расчета и результатов экспериментальных замеров параметров ГТУ

Параметр	Результаты расчета	Результаты эксперимента	Погрешность, %
Коэффициент избытка воздуха α , о.е.	1,27	1,27	-
Расход топлива G_T , кг/с	0,0003	0,0003	-
Расход воздуха G_B , кг/с	0,0055	0,0055	-
Температура на входе в турбину $T_{\text{вхСТ}}$, °К	725,80	737,00	1,51
Мощность P^G , Вт	738,69	730,30	1,73
Перерасчет расход топлива на номинальную мощность ГТУ G_T , м3/ч	112,90	111,62	1,74
Перерасчет расход воздуха на номинальную мощность ГТУ G_B , м3/ч	1698,17	1717,69	1,74

Погрешность расчетов составляет от 1,51% до 1,74%.

Мультиагентная модель обеспечивает определение температуры в камере сгорания, которая напрямую влияет на вырабатываемую электрическую мощность. Также задачей мультиагентной модели является учёт расхода ПНГ (топлива). Мультиагентная модель, имея данные о составе ПНГ, моделирует

расход топлива на объектах генерации, формулирует коэффициент расхода топлива в зависимости от состава газа.

При изменении состава ПНГ возникает необходимость изменения расхода топлива, что также должно учитываться в рамках мультиагентной модели ЭТК, так как добычей ПНГ занимаются объекты ЭТК, а мультиагентной модели необходимо формировать управляющие воздействия по обеспечению баланса мощности в электрической сети НГДП с объектами РГ.

Был произведен перерасчет расхода топлива и расхода воздуха для генерации 80 кВт электрической мощности, то есть номинальных параметров ГТУ. Расход топлива и расход воздуха при разных режимах работы ГТУ, соответствующих параметрам проведенных опытов, приведены в таблице 4.22 и на рисунке 4.29.

Таблица 4.22 – Расходы топлива и воздуха в разных режимах работы ГТУ

Режим работы ГТУ	Коэффициент избытка воздуха о.е.	Температура на входе в турбину, °К	Расход воздуха, м ³ /ч	Расход топлива, м ³ /ч	Удельный расход топлива, $\frac{м^3}{ч \cdot кВт}$
1	1,27	737	1698,17	111,62	1,40
2	0,76	1147	966,26	105,34	1,32
3	0,39	737	1514,91	325,42	4,07

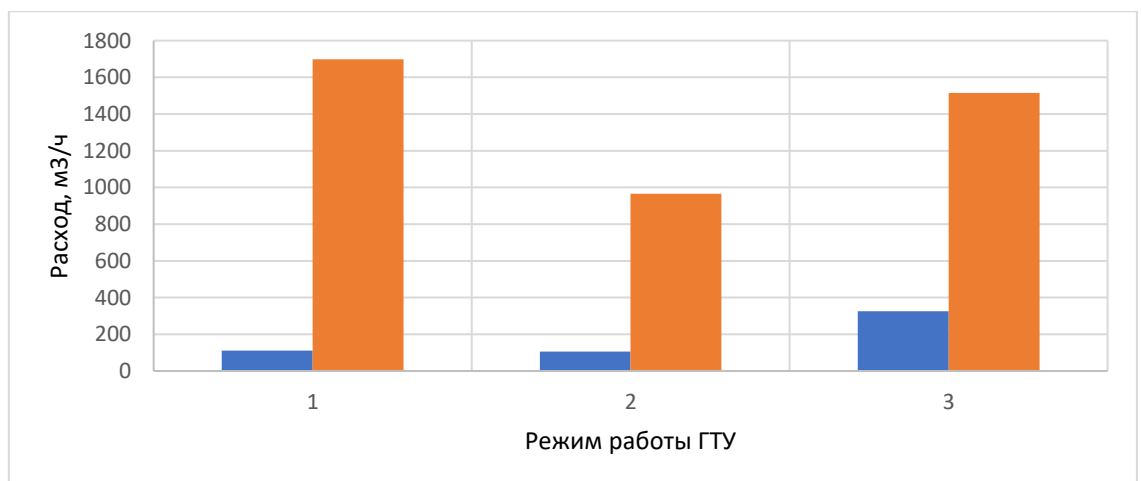


Рисунок 4.29 – Расходы топлива и воздуха, соответствующие разным режимам работы ГТУ

Необходимо провести перерасчет расхода топлива и расхода воздуха для генерации электрической мощности при использовании ПНГ разного состава с других объектов Пермского края. Расчет был проведен при экспериментально подтверждённых параметрах режима работы ГТУ.

Параметры ПНГ с других объектов Пермского края представлены в таблице 4.23.

Таблица 4.23 – Параметры ПНГ объектов Пермского края

Пункт отбора ПНГ	Стехиометрическое соотношение, о. е.	Теплоемкость ПНГ, $\frac{Дж}{кг \cdot ^\circ K}$	Теплопроизводительность ПНГ, кДж/кг	Плотность ПНГ, кг/м ³
Ильичевка	14,80	1833,15	40564,43	1,1006
Чашкино	14,77	1855,60	43556,19	1,0504
Куеда	17,92	1466,23	29285,12	1,8882
Курбаты	17,27	1724,39	39693,95	1,2781
Кокуй	19,50	1743,92	39359,68	1,2415

Результаты расчета расхода топлива и расхода воздуха при работе объектов генерации в номинальном режиме с использованием различного по составу ПНГ представлены в таблице 4.24, а на рисунке 4.30 изображен график зависимости расхода топлива от теплопроизводительности топлива.

Таблица 4.24 – Расходы топлива и воздуха в разных режимах работы ГТУ

Источник ПНГ	Теплопроизводительность ПНГ, кДж/кг	Расход воздуха, м ³ /ч	Расход топлива, м ³ /ч	Удельный расход топлива, $\frac{м^3}{ч \cdot кВт}$
Ильичевка	40564,433	1701,85	127,58	1,60
Чашкино	43556,194	1701,70	121,97	1,52
Куеда	29285,120	1717,19	182,38	2,28
Курбаты	39693,953	1714,41	127,92	1,60
Кокуй	39359,681	1723,15	110,60	1,38

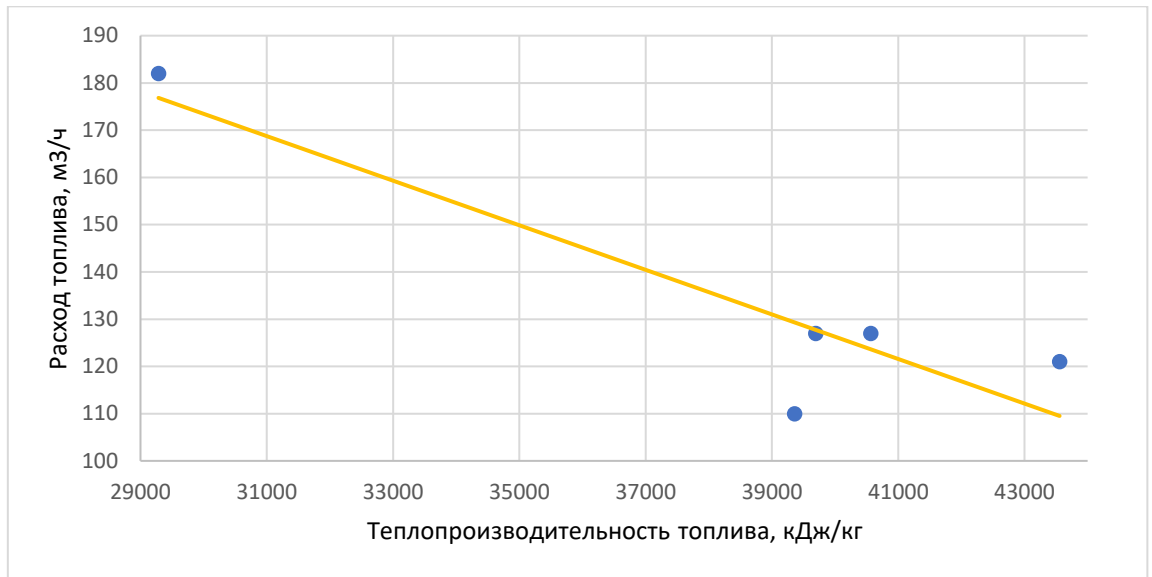


Рисунок 4.30 – График зависимости расхода топлива от теплопроизводительности топлива

Для использования в мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ введен коэффициент состава ПНГ:

$$K_{\text{ПНГ}} = \frac{G_T}{G_{T_{\text{ном}}}} \quad (66)$$

где $G_{T_{\text{ном}}}$ – номинальный расход топлива для установки при использовании номинального топлива.

Методика оценки вырабатываемой мощности исходя из состава ПНГ, поступающего на объекты генерации, позволяет учитывать влияние изменений состава ПНГ при обеспечении баланса мощности в электрической сети НГДП с объектами РГ.

Коэффициент состава ПНГ позволяет оценить влияние состава ПНГ на параметр расхода топлива объектов генерации. Мультиагентная модель ЭТК НГДП с объектами РГ, учитывая изменение состава ПНГ, формирует управляющие воздействия для объектов генерации, а также формирует рекомендации по перераспределению потоков ПНГ для обеспечения баланса топлива.

4.3 Анализ возможности внедрения объектов распределенной генерации на месторождениях нефти и газа Пермского края

Проведен анализ географических локаций в сетях нефтегазодобывающих предприятий Пермского края, где возможно внедрение газотурбинных электроустановок с целью снижения углеродных выбросов и (или) выработки электроэнергии для снабжения ближайших объектов инфраструктуры (Приложение Г).

Собрана, проанализирована и систематизирована следующая информация:

1) объемы попутного газа, локализованного в данных точках: сколько газа транспортируется через узловую точку и сколько газа сжигается, основные принципы функционирования данных объектов, по которым строится модель поставки попутного газа на предполагаемые газотурбинные установки;

2) электротехническая информация о ближайших объектах инфраструктуры: данные о нагрузках, схемы электрических сетей, требования по категориям электроснабжения;

3) информация о типичных выбросах при утилизации газа нефтегазодобывающими предприятиями Пермского края: процент сжигания газа от общего объема полученного попутного газа.

Проведен анализ нефтегазовых месторождений Пермского края. С учетом территориальных особенностей, количественного состава и специфики работы насосных установок различного типа (штанговых глубинных, электроцентробежных), состава добываемого ПНГ, наличия близлежащих населенных пунктов выделено 14 предполагаемых кластеров, для которых целесообразно внедрение генерирующих установок малой и средней мощности. Суммарная мощность генерирующих установок составляет 13 МВт, суммарный объем ПНГ, который может быть использован для генерации, составляет 48 млн. м³ в год, при общем объеме добычи 492 млн. м³ в год.

Вместе с увеличением объемов полезного использования ПНГ также обеспечивается энергетическая автономность удаленных месторождений и объектов инфраструктуры; уменьшается зависимость НГДП от тарифной политики на рынке электроэнергии; снижается нагрузка на окружающую среду в целом, и улучшается экологическая обстановка непосредственно на промыслах.

Выводы по главе 4

1. Разработана цифровая мультиагентная модель ЭТК НГДП с объектами РГ с применением объектно-ориентированного подхода и библиотек параметров объектов, представляющих элементы ЭТК НГДП.
2. Программно реализована методика обеспечения баланса мощности в электрической сети ЭТК Южного купола Юрчукского месторождения.
3. Мультиагентная модель ЭТК НГДП с объектами РГ верифицирована на нескольких лабораторных стендах. Выявлен низкий уровень погрешностей при апробации разработанной методики обеспечения баланса мощности в электрической сети НГДП и низкий уровень погрешностей при моделирования управляющих воздействий цифровой мультиагентной модели на реальном физическом объекте. Верифицирован расчет электрической мощности, исходя из теплопроизводительности ПНГ, при отработке методики обеспечения баланса мощности в электрической сети НГДП.
4. Проведен анализ электрических сетей нефтегазодобывающих предприятиях Пермского края. Выделено 14 возможных кластеров внедрения газотурбинных электростанций с целью снижения углеродных выбросов и (или) выработки электроэнергии для снабжения ближайших объектов инфраструктуры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным результатом диссертационной работы является решение актуальной научной задачи, заключающейся в разработке научно-методического обоснования моделирования ЭТК нефтегазодобывающего предприятия с объектами распределенной генерации, позволяющего обеспечить баланс мощности в электрической сети при внедрении генерирующих установок малой и средней мощности, использующих попутный нефтяной газ.

В ходе работы:

- 1) разработана структура мультиагентной модели электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия, учитывающая в своем составе агентов потребления и агентов генерации, использующих в качестве наблюдаемых параметров дебит нефтегазовой смеси и расход добываемого попутного газа;
- 2) разработаны принципы взаимодействия агентов мультиагентной модели электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия с объектами распределенной генерации, учитывающие зависимости процессов генерации и потребления электрической энергии от параметров технологического процесса добычи нефти и газа;
- 3) разработана методика обеспечения баланса мощности в электрической сети нефтегазодобывающего предприятия, учитывающая баланс топлива при генерации электроэнергии в различных сценариях перехода между электрическими режимами;
- 4) разработана и верифицирована цифровая мультиагентная модель электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия с генерирующими установками малой и средней мощности.

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АВР – автоматическим вводом резервного питания;
БППГ – блочный пункт подготовки газа;
ГТУ – газотурбинной установки;
ГТЭС – газотурбинная электростанция;
ДКС – дожимная компрессорная станция;
ДНС – дожимная насосная станция;
КРУМ – комплектное распределительное устройство;
КТП – комплектная трансформаторная подстанция;
КПД – коэффициент полезного действия;
ЛЭП – линия электропередачи;
МЭК - международная электротехническая комиссия;
НГДП – нефтегазодобывающее предприятие;
НГСП – нефтегазосборный пункт;
ПКС – промежуточная компрессорная станция
ПНГ – попутный нефтяной газ;
ПС – подстанция;
РГ – распределенная генерация;
РЗ – релейная защита;
РАВР – распределенное автоматическое включение резервного питания
СЭС – система электроснабжения;
УВ – управляющее воздействие;
УПСВ – установка предварительного сброса воды;
УЭЦН – установки электроприводных центробежных насосов;
ШСНУ – штанговая скважинная насосная установка;
ЭС – внешняя энергосистема;
ЭТК – электротехнический комплекс;
ЭЦН – электроцентробежный насос.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fursanov M.I., Zolotoy A.A., Makarevich V.V. Calculation of technological consumption (loss) of electricity in modern 0,38–10 kV electrical distribution networks // *Energetic.* – 2018 – № 5 – P. 408–422.
2. Ковалев В.З. Моделирование электротехнических комплексов и систем как совокупности взаимодействующих подсистем различной физической природы // Дис.... доктора техн. наук. Омск . 2000. С. 261.
3. Лоскутов, А.Б. Проблемы перехода электроэнергетики на цифровые технологии // *Интеллектуальная электротехника.* – 2018. – № 1. – С. 9-27.
4. Зеленохат, Н.И. Интеллектуализация ЕЭС России: инновационные предложения: практическое пособие / Н.И. Зеленохат. – М.: Изд. дом МЭИ, 2013.
5. Лоскутов, А.Б. Разработка и исследование гибкой интеллектуальной электрической сети среднего напряжения, основанной на гексагональной структуре / А.Б. Лоскутов, А.А. Лоскутов, Д.В. Зырин // *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева.* – 2016.– №3 (114). – С.85–94.
6. Надтока И.И., Федоров В.А., Демура А.В., Морхов А.Ю., Михайлов В.В., Чукавов А.С., Голикова Е.В., Гуменюк В.В. Повышение надёжности электроснабжения при внедрении межсетевого распределённого автоматического включения резервного питания//*Изв. вузов. Электромеханика.* 2013. № 1. С. 134 -135.
7. Kwasinski, A. Generalized integrated framework for modelling communications and electric power infrastructure resilience / A. Kwasinski, V. Krishnamurthy // 39th IEEE International Telecommunications Energy Conference, INTELEC 2017. – P.99–106. DOI:10.1109/INTLEC.2017.8211686.
8. Kwasinski, A. Quantitative model and metrics of electrical grids' resilience evaluated at a power distribution level / A. Kwasinski // *Energies.* – 2016. – Vol.9, № 2. – P.1–27. DOI:10.3390/en9020093.

9. Farag, H.E. Voltage regulation in distribution feeders with high DG penetration: From traditional to smart [Text] / H.E. Farag and E.F. El-Saadany // IEEE Power and Energy Society General Meeting. – 2011. - P. 1-8
10. Gupta. A Multi-Agent Framework for Operation of a Smart Grid [Text] / Ruchi Gupta, Deependra Kumar Jha, Vinod Kumar Yadav, Sanjeev Kumar // Energy and Power Engineering. – 2013. – № 5. – P.1330–1336.
11. Martini, L. ELECTRA IRP approach to voltage and frequency control for future power systems with high DER penetration / L. Martini, L. Radaelli, H. Brunner, C. Caerts, A. Morch, S. Hanninen, and C. Tornelli. // In Proceedings of 23rd International Conference on Electricity Distribution (CIRED), Lyon. 2015.
12. Olivier, F. Active Management of Low-Voltage Networks for Mitigating Overvoltages Due to Photovoltaic Units [Text] / F. Olivier, P. Aristidou, D. Ernst, and T. Van Cutsem // in IEEE Transactions on Smart Grid, March 2016. - vol. 7, no. 2. - pp. 926-936.
13. Исмоилов, С.Т. Регулирование напряжения на подстанциях распределительной электрической сети с контролем режима прилегающего района: дис. канд. техн. наук. – Новосибирск: НГТУ, 2014. – 151 с.
14. Мукатов, Б.Б. Управление разделением и восстановлением сети с использованием экспертных технологий: дис. канд. техн. наук. – Новосибирск: НГТУ, 2017. – 178 с.
15. Карджаубаев Н. А. Мультиагентное регулирование напряжения в многосвязных электрических сетях: дис. канд. техн. наук. – Новосибирск: НГТУ, 2019. – 176 с.
16. Abur, A. Power system state estimation. Theory and implementation / A. Abur, A.G. Exposito. – Marcel Dekker, 2004.
17. Christakou, K. Voltage control in active distribution networks under uncertainty in the system model: a robust optimization approach / K. Christakou, M. Paolone, A. Abur // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2018. – Vol.9. – №6. – P5631–5642. DOI:10.1109/TSG.2017.2693212.

18. Архитектура интернета энергии, [online] Доступ: <https://idea-go.tech/IDEA-whitepaper-ru.pdf>.
19. Kano, T., Iwamoto, M., & Ueyama, D. Decentralised control of multiple mobile agents for quick, smooth, and safe movement. *Physica A-statistical Mechanics and Its Applications*, 2021. – 572, 125898.
20. Kano, T., Iwamoto, M., & Ueyama, D. Decentralized Control for Self-driving Cars That can Freely Move on Two-dimensional Plane. *Collective Dynamics* 5:A103, 2020. DOI:10.17815/CD.2020.103.
21. Industrial Agents: Emerging Applications of Software Agents in Industry. / Edited by Leitão P., Karnouskos S. – Morgan Kaufmann, 2015. – 476 p.
22. Ворожцова Т. Н. Моделирование ситуаций в задачах ситуационного управления в энергетике // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2016. №1.
23. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: теория и практика. – М.: Наука, 1986. – 228 с.
24. Бурков В.Н., Новиков Д.А. Теория активных систем: состояние и перспективы //М.: СИНТЕГ. – 1999. – 128 с
25. Wooldridge M. An introduction to multiagent systems. – John Wiley & Sons, 2009. – 484 p.
26. Agent Technology: Foundations, Applications, and Markets/ Edited by Jennings N.R., Wooldridge M.J. – Springer, 2002. – 325 p.
27. Tambe M. Towards flexible teamwork // Journal of artificial intelligence research. – 1997. – V. 7. – P. 83-124.
28. Rzevski G., Skobelev P. Managing complexity. – Wit Press, 2014. – 216 p.
29. Тарасов В. Б. Агенты, многоагентные системы, виртуальные сообщества: стратегическое направление в информатике и искусственном интеллекте // Новости искусственного интеллекта. – 1998. – №. 2. – С. 5-63.
30. Городецкий В. И. и др. Мультиагентные технологии для оперативного управления ресурсами в реальном времени // Третья

мультиконференция по проблемам управления (12-14 октября 2010 г., Санкт-Петербург): материалы конференции. – Санкт-Петербург: ОАО «Концерн ЦНИИ Электроприбор», 2010. – С. 12-14.

31. Граничин О.Н., Скобелев П.О. Суперкомпьютеры и мультиагентные технологии для решения сложных задач управления ресурсами в реальном времени // Суперкомпьютеры. – № 4(16). – 2013. – С.54-59.

32. Виттих В.А., Моисеева Т.В., Скобелев П.О. Принятие решений на основе консенсуса с применением мультиагентных технологий // Онтология проектирования. – 2013. – №. 2 (8) – С. 20-25.

33. Скобелев П.О., Майоров И.В. Мультиагентные технологии в интеллектуальных системах управления ресурсами в реальном времени // Морские информационно-управляющие системы. – 2015. – №1(7). – С. 24-39.

34. Городецкий В.И., Грушинский М.С., Хабалов А.В. Многоагентные системы (обзор) // Новости искусственного интеллекта. – 1998. – Т. 2. – С. 64-117.

35. Волошин, А.А., Анализ возможностей применения мультиагентных систем для задач автоматического управления в энергосистемах [Текст] / А.А. Волошин, А.В. Жуков // Релейная защита и автоматика энергосистем: Сб. докл. XXII науч.-практ. конф. – Москва: 2014. - С. 256-263.

36. Волошин, А.А. Применение мультиагентных систем в электроэнергетике за рубежом и в России. Часть 1-3 [Текст] / А.А Волошин, А.В. Жуков, И.Л. Архипов // Вести в электроэнергетике. – 2016. - №№ 2-4.

37. Методологии проектирования мультиагентных систем / М. Г. Зубарева, А. А. Цветков, Анис Ленин Хамуш [и др.]. — Текст: непосредственный // Технические науки в России и за рубежом: материалы VI Междунар. науч. конф. (г. Москва, ноябрь 2016 г.). — Москва: Буки-Веди, 2016. — С. 3-8.

38. Ning Xie, Franco Torelli, Ettore Bompard, Alfredo Vaccaro. Dynamic computing paradigm for comprehensive power flow analysis // ET Gener. Transm. Distrib., 2013, Vol. 7, Iss. 8, pp. 832–842, DOI: 10.1049/iet-gtd.2012.0350
39. Автоматизация диспетчерского управления в электроэнергетике / Под общей ред. Руденко Ю.Н., Семенов В.А. — М.: Издательство МЭИ, 2000. - 648 с.: ил.
40. Marcos Tostado-Véliz, Salah Kamel, Francisco Jurado. Power Flow Solution of Ill-conditioned Systems Using Current Injection Formulation: Analysis and a Novel Method // International Journal of Electrical Power & Energy Systems 127(106669) DOI: 10.1016/j.ijepes.2020.106669
41. Petrochenkov A.B. Regarding Life-Cycle Management of Electrotechnical Complexes in Oil Production. Russian Electrical Engineering, 2012, vol. 83, No.11., pp.621-627. DOI: 10.3103/S1068371212110090.
42. Khalghani MR, Verma V, Khushalani Solanki S, Solanki JM. Resilient Networked Control of Inverter-Based Microgrids against False Data Injections. Electronics. 2022; 11(5):780. <https://doi.org/10.3390/electronics11050780>
43. Barik, P.K., Shankar, G. & Sahoo, P.K. Investigations on Split-Source Inverter Based Shunt Active Power Filter Integrated Microgrid System for Improvement of Power Quality Issues. J. Electr. Eng. Technol. (2022). <https://doi.org/10.1007/s42835-022-00999-3>
44. Guozhou Zhang, Weihao Hu, Di Cao, Zhenyuan Zhang, Qi Huang, Zhe Chen, Frede Blaabjerg, A multi-agent deep reinforcement learning approach enabled distributed energy management schedule for the coordinate control of multi-energy hub with gas, electricity, and freshwater, Energy Conversion and Management, Volume 255, 2022, 115340, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115340>.
45. Тюкин, И. Ю., Адаптация в нелинейных динамических системах / И.Ю. Тюкин, В.А. Терехов // (Серия: Синергетика: от прошлого к будущему), СПб: ЛКИ, 2008. – 384 с.

46. Майоров И. В. Мультиагентные модели и технологии ситуационного управления ресурсами предприятий в условиях неопределенности, 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (промышленность) дис. канд. техн. наук, Самара – 2017

47. Katyal M., Mishra A. A Comparative Study of Load Balancing Algorithms in Cloud Computing Environment // International Journal of Distributed and Cloud Computing. – 2015. – V. 1. – №. 2. – P. 5-11

48. Амелина Н. О., Граничин О.Н. Управление балансировкой загрузки в вычислительных сетях // Глава 13 в монографии «Проблемы сетевого управления» – СПб.: Наука. – 2015. – С.297-318.

49. Monczka R. M. et al. Purchasing and supply chain management. – Cengage Learning, 2015. – 888 p.

50. В. А. Виттих, П. О. Скобелев, Мультиагентные модели взаимодействия для построения сетей потребностей и возможностей в открытых системах, Автомат. и телемех., 2003, выпуск 1, 177–185

51. Скобелев П.О. Ситуационное управление и мультиагентные технологии: коллективный поиск согласованных решений в диалоге // Онтология проектирования. 2013. №2

52. Зраенко А.С., Аксенов К.А., Федотов В.П. Сравнительный анализ мультиагентных моделей процессов преобразования ресурсов // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 4.

53. Методологии проектирования мультиагентных систем / М. Г. Зубарева, А. А. Цветков, Анис Ленин Хамуш [и др.]. — Текст : непосредственный // Технические науки в России и за рубежом : материалы VI Междунар. науч. конф. (г. Москва, ноябрь 2016 г.). — Москва : Буки-Веди, 2016. — С. 3-8.

54. Evora J., Kremers E., Cueva S., Hernandez M., Hernandez J., and VIEJO P. Agent based modelling of electrical load at household level. In S. Stepney, P.H. Welch, and P.S. Andrews, editors, ECAL 2011: CoSMoS - Proceedings of the

2011 Workshop on Complex Systems Modelling and Simulation, page 15. Paris, 2011.

55. Liu J., Ohsuga S., Bradshaw J. Intelligent Agent Technology. N.Y., 2002.

56. Постановка задачи разработки мультиагентной системы для оценивания состояний ЭЭС с учетом структурной и функциональной декомпозиции / В.И. Гальперов, И.Н. Колосок, Л.В. Массель, А.С. Пальцев // Информационные и математические технологии в науке и управлении: Труды XVIII Байкальской Всеросс. конф. Ч. III. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2013. – С. 231–234.

57. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Ушаков В.А., Алексеенко В.А. Оперативное управление в системах электроснабжения железных дорог: монография. Иркутск: ИрГУПС, 2012. 129 с.

58. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока: монография. Иркутск: ИрГУПС, 2011. 170 с.

59. Фомин В. Н., Фрадков А. Л., Якубович В. Н. Адаптивное управление динамическими объектами. — М.: Наука, 1981. — 448 с.

60. Ядыкин И. Б., Шумский В. М., Овсепян Ф. А. Адаптивное управление непрерывными технологическими процессами. — М: Энергоатомиздат, 1984. — 240 с.

61. Плащанский Л. А. Основы электроснабжения горных предприятий: Учебник для вузов. – 2-е изд., исправ. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2006. – 499 с.: ил. ISBN 5-7418-0441-1 (в пер.).

62. Веников В. А. Веников Г. В. Теория подобия и моделирования (применительно к задачам электроэнергетики) : Учебник для вузов по спец. «Кибернетика электр. Систем». – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. Шк., 1984. – 439 с., ил.

63. Вайнштейн Р.А. Математические модели элементов электроэнергетических систем в расчетах установившихся режимов и переходных процессов: учебное пособие / Р.А. Вайнштейн, Н.В. Коломиец, В.В. Шестакова. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 115 с.
64. Установки погружных центробежных насосов для добычи нефти / науч. ред. В. Ю. Алекперова, В. Я. Кершенбаума. – М. : ТЕХНОНТЕГАЗ, 1998. – 611 с.
65. Об оценке электропотребления погружного электрооборудования на физической модели / С. В. Мишуриных, А. Б. Петроченков, А. В. Ромодин, А. В. Ляхомский, Е. Н. Перфильева // Промышленная энергетика. - 2020. - № 8. - С. 26-33., ВАК.
66. Кабышев А.В., Обухов С.Г. Расчет и проектирование систем электроснабжения: Справочные материалы по электрооборудованию: Учеб. пособие / Том. политехн. ун-т. – Томск, 2005. – 168 с.
67. Приказ Министерства энергетики РФ от 23 июня 2015 г. N 380 «О порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии»
68. W. I. Rowen, “Simplified Mathematical Representations of single-shaft gas turbines in mechanical drive services,” Turbo Mach. Int., vol. 33, no. 5, pp. 26–32, 1992.
69. Dynamic Models Package „Standard-1“, GMB Dynamic Models for PSS® Soft-ware Product Suite, Revision 1.7 / October 2012
70. Working Group on Prime Mover and Energy Supply Models for System Dynamic Performance Studies, “Dynamic models for combined cycle plants in power system studies,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 9, no. 3, pp. 1698–1708, 1994.

71. K. Kunitomi, A. Kurita, and H. Okamoto, "Modeling Frequency Dependency of gas turbine output," Power Eng. Soc. Winter Meet. 2001. IEEE, vol. 00, no. C, pp. 678–683, 2001.
72. CIGRE Task Force C4.02.25, "Modeling of Gas Turbines and Steam Turbines in Combined Cycle Power Plants", December, 2003.
73. Power System Dynamic Performance Committee, Power System Stability Subcom-mittee, "Dynamic Models for Turbine-Governors in Power System Studies, IEEE PES Re-source Center," 2013.
74. NERC MOD-027-1 – List of Acceptable Models for Use in Dynamic Simulation, PJM Interconnection," pp. 1–6, 2014.
75. Бахмисов, О.В. Выбор моделей газотурбинных и парогазовых установок для расчётов переходных процессов в электроэнергетической системе [Текст]: дис. канд. тех. наук: 05.14.02: - М., 2018. - 135 с
76. ГОСТ 27430-87 (МЭК 34-10) МАШИНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВРАЩАЮЩИЕСЯ, Условные обозначения для описания синхронных машин
77. Программный комплекс RUSTab Руководство пользователя [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.rastrwin.ru/rastr/index.php> (дата обращения: 17.05.2022).
78. Использование антикоррозионных присадок при сжигании серосодержащих углеводородных топлив / О. О. Матюнин, Н. Л. Бачев, Р. В. Бульбович, Н. Ю. Бачева // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника = Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Aerospace engineering. - 2017. - № 48. - С. 78-88., ВАК
79. Белобородов С. С. Снижение эмиссии CO₂: развитие когенерации или строительство ВИЭ? Энергосовет. 2018. № 1 (58). С. 16–25. — URL: www.energsovet.ru.
80. Перспективы России на глобальном рынке водородного топлива: экспертно-аналитический отчет / под ред. Д. Холкина. — М., 2018. — 26 с.

81. Тарасов Б. П. Водородное аккумулирование электроэнергии из возобновляемых источников // Сб. трудов шестой всероссийской конференции с международным участием «Топливные элементы и энергоустановки на их основе». — Черноголовка, 2019. С. 43–45

82. Бакланов А.В. Возможность использования метано-водородного топлива в конвертированных газотурбинных двигателях для энергетических установок // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. №1.

83. Анализ характеристик горения водородных и углеводородных топлив по результатам численного моделирования / О. О. Матюнин, С. К. Архипов, А. А. Шилова, Н. Л. Бачев, Р. В. Бульбович // Проблемы региональной энергетики [Electronic resource]. - 2022. - № 3 (55). - С. 54-67. - URL: https://journal.ie.asm.md/assets/files/05_03_55_2022.pdf (дата обращения: 24.08.2022). - DOI 10.52254/1857-0070.2022.3-55.05., РИНЦ

84. Конвертирование камеры сгорания микрогазотурбинной установки для сжигания водородного топлива / А. А. Шилова, И. В. Щербакова, Н. Л. Бачев, Н. Ю. Бачева // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации 2022 : материалы XXIII Всерос. науч.-техн. конф. (г. Пермь, 16-18 нояб. 2022 г.) / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Перм. нац. исслед. политехн. ун-т, М-во образования и науки Перм. края. - Екатеринбург : [Цифр. решения], 2022. - С. 269-271.

85. Абраменкова Н.А., Воропай Н.И., Заславская Т.Б. Структурный анализ электроэнергетических систем. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990.

86. Петроченков А. Б. Автоматизация выбора режимов функционирования систем электроснабжения нефтеперерабатывающих предприятий: диссертация... кан. техн. наук: 05.13.06. — Пермь, 2003. — 169 с.

87. Применение вычислительных методов в энергетике: Обзор докладов VIII Международной конференции / Под ред. В. А. Веникова, Ю. Ф. Архипцева. М.: Энергоатомиздат, 1987. 176 с. — (Энергетика за рубежом).

88. Воропай Н.И., Бат-Ундрал Б. Расчеты режимов радиальной электрической сети интервальным методом // Электричество. 2008 — № 10. — С. 64–66.

89. Веретенников Л. П. Исследование процессов в судовых электроэнергетических системах. Теория и методы. Л.: Судостроение, 1975.

90. Винокур В. М. Математическое моделирование газотурбинных мини-электростанций и мини-энергосистем: моногр. / В. М. Винокур, Б. В. Кавалеров, А. Б. Петроченков, М. Л. Сапунков. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010. – 299 с. ISBN 978-5-398-00396-3/

91. Изотов С. П., Шашкин В. В., Капралов В. М. и др.: Под общей ред. В.В Шашкина «Авиационные ГТД в наземных установках», Л.: Машиностроение, 1984. 228 с.

92. Моделирование сжигания попутного нефтяного газа в утилизационной камере сгорания / Н. Л. Бачев, О. О. Матюнин, А. А. Шилова, Р. В. Бульбович // Инженерно-физический журнал = Journal of Engineering Physics and Thermophysics. - 2021. - Т. 94, № 4. - С. 1001-1008., РИНЦ

93. Махнутин А.К., Кавалеров Б.В.: О вопросах применения газотурбинных установок и парогазовых установок в энергетике // Электротехника, информационные технологии, системы управления –2015. – № 15. – с.87

94. А.А.Иноземцев, М.А.Ннхамкин, В.Л.Сандраикнй «Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок»: Учебник для студентов специальности «Авиационные двигатели и энергетические установки». Серия: «Газотурбинные двигатели». М.-«Машиностроение», 2007.

95. Влияние состава и параметров подачи нефтяного газа на пределы горения в утилизационной камере сгорания / А. А. Шилова, Р. В. Бульбович, Н. Л. Бачев, О. О. Матюнин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая

техника = Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Aerospace engineering. - 2020. - № 60. - С. 64-71., ВАК

96. Утилизация разнородных нефтяных газов в универсальной малоэмиссионной газотурбинной установке с внешним подогревом топливного газа / А. А. Шилова, Н. Л. Бачев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. - 2021. - Т. 332, № 10. - С. 95-104., ВАК

97. Влияние состава и параметров подачи нефтяного газа на его пределы горения / А. А. Шилова, Н. Л. Бачев, Р. В. Бульбович // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации 2019 : материалы XX Всерос. науч.-техн. конф. (г. Пермь, 1416 нояб. 2019 г.) : в 2-х ч. 2 / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Перм. нац. исслед. политехн. ун-т, М-во образования и науки Перм. края, Науч.-произв. об-ние Искра. - Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2019. - С. 216-219.

98. Конвертирование микрогазотурбинных установок для утилизации нефтяного газа / Н. Л. Бачев, О. О. Матюнин, А. А. Шилова, А. М. Клещевников // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации 2019 : материалы XX Всерос. науч.-техн. конф. (г. Пермь, 1416 нояб. 2019 г.) : в 2-х ч. ч. 2 / М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Перм. нац. исслед. политехн. ун-т, М-во образования и науки Перм. края, Науч.-произв. об-ние Искра. - Пермь : Изд-во ПНИПУ, 2019. - С.27-30.

99. Гуревич Ю.Е. Особенности расчетов режимов в энергорайонах с распределенной генерацией: монография / Ю.Е. Гуревич, П.В. Илюшин. – Н. Новгород: НИУ РАНХиГС, 2018. – 280 с.

100. Идельчик В. И. Электрические системы и сети: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.: ил. ISBN 5-283-01012-0.

101. Шелухина, Т.И. Расчеты нормальных и предельных по мощности установившихся режимов сложных энергосистем: учеб. пособие / Т.И. Шелухина. – М.: Изд-во МЭИ, 2005.

102. Автоматизация диспетчерского управления в электроэнергетике / Под общей ред. Ю. Н. Руденко и В. А. Семенова. М.: Издательство МЭИ, 2000. – 648 с.: ил. ISBN 5-7046-0528-1.
103. ГОСТ 32144-2013 Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная: Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Дата введения 2014-07-01.
104. Гусейнов Ф. Г., Рахманов Н. Р. Оценка параметров и характеристик энергосистем. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 152 с.: ил. ISBN 5-283-01073-2.
105. Гамм, А.З. Методы оценивания состояния в энергосистемах / А.З. Гамм. – М.: Наука, 1980.
106. Крумм, Л.А. Методы оптимизации при управлении электроэнергетическими системами / Л.А. Крумм. – Новосибирск: Наука, 1980.
107. CSoft.ru: Официальный сайт группы компаний CSoft [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.csoft.ru/>, свободный. – Загл. с экрана.
108. Программа DIgSILENT PowerFactory: Официальный сайт. URL: <http://www.digsilent.de>.
109. Rastrwin.ru: Официальный сайт филиала ОАО «НИИПТ» «Системы управления энергией» [Электронный ресурс]. – Екатеринбург. – Режим доступа: <http://www.rastrwin.ru>, свободный. – Загл. с экрана.
110. Isem.irk.ru : Официальный сайт Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН) [Электронный ресурс]. – URL: <http://isem.irk.ru>. – Загл. с экрана.
111. Oaoesp.ru : Официальный сайт Новосибирского проектно-изыскательского и научно-исследовательского института «Энергосетьпроект» [Электронный ресурс]. – URL: <http://oaoesp.ru>. – Загл. с экрана.

112. Anares.ru : Официальный сайт ООО «ИДУЭС» [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.anares.ru>. – Загл. с экрана.

113. Rtp3.ru : Официальный сайт ООО «Энергоэкспертсервис» [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.rtp3.ru>. – Загл. с экрана.

114. Микротурбинные установки Capstone [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://promprivod.ru/useruploads/files/bpc/capstone_brochure5.pdf, свободный (дата обращения: 15.06.2022).

115. Отчет о выполненной научно-исследовательской работе по договору № 18z2750/2019/051 от 22.01.2019 г. по теме: «Разработка подсистемы поддержки/управления жизненного цикла электротехнического оборудования модуля информационно-аналитической поддержки по интеллектуальному управлению системами электроснабжения цехов добычи нефти и газа в системе объединённого инженерного тренажёра».

116. Отчет о выполненной научно-исследовательской работе по договору № 19z2837/2019 от 25.12.2019 г. по теме: «Разработка методики планирования потребления электрической энергии объектами нефтедобычи ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ». Оценка влияния технического состояния электротехнического оборудования на надёжность систем электроснабжения ЦДНГ-11, 12 и на их энергетическую эффективность».

117. Моделирование химических и фазовых равновесий при высоких температурах «Астра 4» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.lpre.de/resources/software/astra4.txt#:~:text=Алгоритм%20программного%20комплекса%20АСТРА.,из%20двух%20возможных%20конденсированных%20растворов> (дата обращения: 15.04.2023).

118. Мингазов Б.Г. Камеры сгорания газотурбинных двигателей: конструкция, моделирование процессов и расчет. Казань, Издательство КГТУ, 2006, 219 с.

Приложение А. Библиотека объектов технологического процесса добычи нефти и газа

Таблицы содержат типовые объекты, используемые при моделировании. Результаты расчета удельного потребления объектов электроснабжение технологических установок/комплексов представлены в таблицах А.1 – А.2.

Таблица А.1 – Параметры удельного потребления УЭЦН ПС Нартовка

КТП	Технологическое наименование	Паспортные данные	$P_{\text{пэд}}, \text{кВт}$	$\Delta P, \text{кВт}$	$P_{\text{полн}}, \text{кВт}$	$Q_{\text{ном}}, \text{м}^3/\text{сут}$	$W, \text{кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$
КТП-2303	QF1 (СКВ.№1)	ПЭД 70 U=1650 В	70	27,82	97,82	104	22,58
КТП-2303	QF2 (СКВ.№3)	ПЭД 36 U=1270 В	36	15,75	51,75	53	23,23
КТП-2303	QF10 (СУ СКВ.№2)	ПЭД 70 U=1650 В	70	28,65	98,65	104	22,77
КТП-2304	QF2 (СКВ.№112)	ПЭД 40 U=1200 В	40	21,02	61,02	59	24,65
КТП-2304	QF3 (СКВ.№5)	ПЭД 32 U=1000 В	32	16,38	48,38	48	24,43
КТП-2304	QF4 (СКВ.№118)	ПЭД 45 U=1400 В	45	19,94	64,94	67	23,32
КТП-2304	QF8 (СКВ.№4)	ПЭД 50 U=1500 В	50	21,45	71,45	74	23,09
КТП-2307	QF8 (СУ СКВ.№113)	ПЭД 45 U=1400 В	45	12,64	57,64	67	20,70
КТП-2307	QF12 (СКВ.№117)	ПЭД 45 U=1400 В	45	19,26	64,26	67	23,08
КТП-2307	QF13 (СУ СКВ.№215)	ПЭД 45 U=1050 В	45	24,85	69,85	67	25,08
КТП-2308	QF9 (СКВ.320)	ПЭД 32 U=1000 В	32	14,92	46,92	48	23,69
КТП-2308	QF10 (СКВ.121)	ПЭД 36 U=1200 В	36	15,87	51,87	53	23,28
КТП-2308	QF11 (СКВ.327)	ВД 14 U=410 В	14	12,65	26,65	21	30,76
КТП-2308	QF12 (СКВ.208)	ПЭД 36 U=1200 В	36	13,40	49,40	53	22,17
КТП-2309	QF9 (СУ СКВ.114)	ПЭД 32 U=950 В	32	18,60	50,60	48	25,55
КТП-2309	QF10 (СУ СКВ.317)	ПЭД 45 U=1400 В	45	23,47	68,47	67	24,59
КТП-2309	QF11 (СУ СКВ.111)	ПЭД 45 U=1400 В	45	19,87	64,87	67	23,29
КТП-2310	QF1 (СУ СКВ.115)	ПЭД 40 U=1200 В	40	20,95	60,95	59	24,62
КТП-2310	QF2 (СУ СКВ.318)	ПЭД 45 U=1400 В	45	19,16	64,16	67	23,04
КТП-2310	QF3 (СУ СКВ.119)	ПЭД 32 U=950 В	32	15,90	47,90	48	24,19
КТП-2310	QF4 (СУ СКВ.120)	ПЭД 32 U=1000 В	32	18,65	50,65	48	25,58
КТП-2311	AB-5 (СУ СКВ.329)	ПЭД 36 U=1200 В	36	13,21	49,21	53	22,09
КТП-2311	AB-6 (СУ СКВ.322)	ПЭД 45 U=1400 В	45	19,42	64,42	67	23,13
КТП-2311	AB-7 (СУ СКВ.116)	ПЭД 40 U=1200 В	40	20,09	60,09	59	24,28

Таблица А.2 – Параметры удельного потребления УЭЦН ПС Шершневка

КТП	Технологическое наименование	Паспортные данные	$P_{пэд}$, кВт	ΔP , кВт	$P_{полн}$, кВт	$Q_{ном}$, м ³ /сут	W , кВт·ч/м ³
КТП-2312	АВ-2 (СУ скв.125)	ПЭД 45 U=1400 В	45	21,37	66,37	67	23,83
КТП-2312	АВ-3 (СУ скв.323)	ПЭД 45 U=1540 В	45	17,62	62,62	67	22,49
КТП-2312	АВ-4 (СУ скв.214)	ПЭД 36 U=1270 В	36	14,72	50,72	53	22,77
КТП-2312	АВ-5 (СУ скв.321)	ПЭД 32 U=1130 В	32	13,01	45,01	48	22,73
КТП-0703	СУ скв.219	ПЭД 32 U=1130 В	32	12,09	44,09	48	22,267
КТП-0703	СУ скв.220	ПЭД 32 U=1130 В	32	14,21	46,21	48	23,336
КТП-0703	4 (Скв.64)	ПЭД 28 U=800 В	28	23,80	51,80	42	29,898
КТП-0706	Скв. 228	ПЭД 32 U=1000 В	32	16,72	48,72	48	24,601
КТП-0706	2 (Скв.227)	ПЭД 63 U=1800 В	63	29,87	92,87	94	23,820
КТП-0706	Скв. 102	ПЭД 40 U=1200 В	40	18,94	58,94	59	23,811
КТП-0706	Скв. 233	ПЭД 28 U=900 В	28	14,07	42,07	42	24,279
КТП-0706	Скв. 79	ВД 30 U=1000 В	30	12,50	42,50	45	22,891
КТП-0706	Скв. 80	ПЭД 28 U=900 В	28	15,13	43,13	42	24,890
КТП-0707	СУ скв.234	ВД 56 U=1600 В	56	20,61	76,61	83	22,105
КТП-0707	СУ скв.401	ПЭД 25 U=800 В	25	12,85	37,85	37	24,464
КТП-0708	2 (Скв.407)	ПЭД 32 U=1130 В	32	16,08	48,08	48	24,279
КТП-0708	СУ скв.404	ПЭД 22 U=750 В	22	12,05	34,05	33	25,007
КТП-0708	Скв.221	ПЭД 36 U=1100 В	36	16,67	52,67	53	23,644
КТП-0708	Скв.409	ПЭД 25 U=800 В	25	12,72	37,72	37	24,382
КТП-0709	АВ-2 (Скв.66)	ПЭД 32 U=1000 В	32	14,35	46,35	48	23,405
КТП-0710	АВ-2 (Скв.212)	ПЭД 45 U=1540 В	45	17,80	62,80	67	22,552
КТП-0711	СУ скв.205	ПЭД 45 U=1400 В	45	11,14	56,14	67	20,159
КТП-0711	СУ скв.207	ПЭД 32 U=1000 В	32	17,05	49,05	48	24,770
КТП-0711	СУ скв.213	ПЭД 45 U=1400 В	45	22,50	67,50	67	24,241
КТП-0712	СУ скв.214	ПЭД 32 U=1000 В	32	17,44	49,44	48	24,969
КТП-0712	АВ-2 (СУ скв.413)	ПЭД 24 U=660 В	24	18,38	42,38	36	28,534
КТП-0802	Скв. 416	ПЭД 32 U=1000 В	32	14,03	46,03	48	23,244
КТП-0802	Скв. 417	ПЭД 28 U=900 В	28	14,54	42,54	42	24,551
КТП-1201	2 (скв.63)	ПЭД 32 U=950 В	32	18,82	50,82	48	25,666
КТП-1202	СУ скв. 414	ВД 30 U=960 В	30	16,08	46,08	45	24,821
КТП-1202	СУ скв.301	ПЭД 32 U=1000 В	32	17,57	49,57	48	25,031
КТП-1203	скв.208	ПЭД 32 U=1000 В	32	17,59	49,59	48	25,043

Окончание таблицы А.2

КТП	Технологическое наименование	Паспортные данные	$P_{пэд},$ кВт	$\Delta P,$ кВт	$P_{полн},$ кВт	$Q_{ном},$ м ³ /сут	$W,$ кВт·ч/м ³
КТП-1203	СКВ. 209	ПЭД 45 U=1400 В	45	21,72	66,72	67	23,958
КТП-1203	АВ-2 (СКВ.419)	ПЭД 24 U=660 В	24	21,52	45,52	36	30,646
КТП-1204	СКВ. 104	ПЭД 24 U=900 В	24	13,91	37,91	36	25,525
КТП-1204	СКВ. 68	ПЭД 32 U=1000 В	32	19,53	51,53	48	26,024
КТП-1205	АВ-1 (СКВ.222)	ПЭД 45 U=1400 В	45	21,07	66,07	67	23,726
КТП-1205	АВ-2 (СКВ.215)	ПЭД 32 U=1000 В	32	18,06	50,06	48	25,281
КТП-1206	СКВ.103)	ПЭД 22 U=700 В	22	15,92	37,92	33	27,850
КТП-1206	СКВ.410)	ПЭД 28 U=800 В	28	16,33	44,33	42	25,586
КТП-1207	СКВ. 70	ПЭД 32 U=900 В	32	16,45	48,45	48	24,468
КТП-1207	СКВ. 229	ПЭД 40 U=1250 В	40	18,33	58,33	59	23,565
КТП-1207	СКВ. 406	ВД 40 U=1200 В	40	15,49	55,49	59	22,419
КТП-1208	СКВ.231	ВД 28 U=800 В	28	14,69	42,69	42	24,636
КТП-1208	СКВ.230	ПЭД 32 U=1000 В	32	17,35	49,35	48	24,920
КТП-1208	СКВ.402	ПЭД 45 U=1400 В	45	21,42	66,42	67	23,851
КТП-1209	СУ СКВ.235	ПЭД 45 U=1400 В	45	21,37	66,37	67	23,835
КТП-1402	1 (ПР-2 СКВ.203)	ПЭД 45 U=1400 В	45	22,42	67,42	67	24,210
КТП-1402	ПР-3 СКВ.204	ПЭД 32 U=950 В	32	18,79	50,79	48	25,647
КТП-1402	ПР-4 СКВ.423	ПЭД 24 U=660 В	24	18,87	42,87	36	28,865
КТП-1402	СКВ.67	ПЭД 32 U=1000 В	32	16,77	48,77	48	24,626
КТП-1404	СУ СКВ.57	ПЭД 32 U=950 В	32	15,44	47,44	48	23,954
КТП-1404	СУ СКВ.216	ВД 40 U=1050 В	40	17,06	57,06	59	23,053
КТП-1404	СУ СКВ.217	ВД 30 U=690 В	30	19,66	49,66	45	26,750
КТП-1404	СУ СКВ.420	ПЭД 28 U=900 В	28	14,31	42,31	42	24,420
КТП-1701	6 (СКВ.65)	ПЭД 24 U=660 В	24	20,29	44,29	36	29,823

Приложение Б. Библиотека объектов системы электроснабжения

В таблицах представлен расчет потерь в электрооборудовании, апробация (на примере ЦДНГ-12) алгоритма расчета потерь в электрооборудовании. Расчет потерь позволяет определить эффективность текущего режима добычи. Расчет ведется на основе однолинейных схем электроснабжения и паспортных данных оборудования. Расчет потерь производился для каждого типа оборудования в отдельности. Для удобства интерпретации данных результаты расчета потерь были структурно рассредоточены по соответствующим КТП, а также по ПС. Для оценки эффективности использования распределительной сети для каждой КТП были определены КПД – в данном случае коэффициенты, отражающие соотношение переданной мощности к потребленной на узлах коммерческого учета. Результаты расчета потерь и КПД каждой КТП представлены в таблицах Б.1-Б.5.

Таблица Б.1 – Результаты расчета потерь на КТП ПС Нартовка

Объект	$P_{\text{полезн, кВт}}$	$P_{\text{потери, кВт}}$	$P_{\text{полная, кВт}}$	КПД, %
КТП-2301 (ДНС-1107 Кондас)	1450,88	664,56	2115,44	68,585
КТП-2302	36,68	18,78	55,47	66,139
КТП-2303	511,97	218,84	730,81	70,055
КТП-2304	628,61	277,78	906,40	69,353
КТП-2307	933,35	403,10	1336,44	69,838
КТП-2308	794,68	348,38	1143,06	69,522
КТП-2309	724,09	323,73	1047,82	69,104
КТП-2310	785,02	349,26	1134,28	69,208
КТП-2311	773,83	404,20	1178,03	65,688
КТП-2312	740,22	318,04	1058,25	69,947

Таблица Б.2 – Результаты расчета потерь на КТП ПС Шершневка

Объект	$P_{\text{полезн, кВт}}$	$P_{\text{потери, кВт}}$	$P_{\text{полная, кВт}}$	КПД, %
КТП-0301	269,02	128,90	397,92	67,607
КТП-0702	141,54	61,70	203,24	69,642
КТП-0703	567,37	282,95	850,32	66,724
КТП-0704	193,51	96,76	290,28	66,665
КТП-0705	141,54	61,80	203,35	69,606
КТП-0706	567,98	264,91	832,88	68,194
КТП-0707	556,37	238,92	795,29	69,958
КТП-0708	311,57	145,26	456,83	68,203
КТП-0709	164,37	77,52	241,89	67,952
КТП-0710	378,22	167,36	545,58	69,325
КТП-0711	494,96	212,28	707,24	69,985
КТП-0712	251,65	121,32	372,97	67,472
КТП-0801	127,48	60,40	187,87	67,853
КТП-0802	380,99	174,33	555,32	68,607
КТП-0803	391,91	172,93	564,84	69,384
КТП-1201	126,16	60,39	186,54	67,629
КТП-1202	184,89	86,73	271,62	68,070
КТП-1203	292,07	146,57	438,63	66,586
КТП-1204	508,44	248,35	756,80	67,183
КТП-1205	306,89	144,26	451,15	68,023
КТП-1206	268,58	127,25	395,83	67,852
КТП-1207	509,42	239,03	748,44	68,063
КТП-1208	153,91	76,53	230,45	66,789
КТП-1209	194,49	86,44	280,93	69,230
КТП-1210	242,42	106,73	349,15	69,432
КТП-1402	534,39	255,40	789,79	67,662
КТП-1403	122,28	54,46	176,74	69,186
КТП-1404	583,36	271,40	854,76	68,248
КТП-1701	494,17	242,31	736,49	67,099

Таблица Б.3 – Результаты расчета потерь на КТП ПС Нефтяная

Объект	$P_{\text{полезн, кВт}}$	$P_{\text{потери, кВт}}$	$P_{\text{полная, кВт}}$	КПД, %
КТП-13А01	419,69	224,84	644,53	65,115
КТП-13А02	433,83	196,30	630,13	68,847
КТП-13А04	92,20	46,59	138,79	66,429
КТП -13А06	244,56	105,36	349,93	69,890
КТП-13А09	192,73	88,78	281,51	68,463
КТП-13А10	293,17	136,61	429,78	68,214
КТП-13А11	343,44	165,50	508,94	67,481
КТП-13А12	347,18	175,02	522,20	66,483
КТП-13А13	355,33	180,47	535,80	66,317
КТП-13Б01	234,05	105,09	339,14	69,012
КТП-13Б02	223,48	104,28	327,76	68,183
КТП-13Б03	262,67	125,93	388,60	67,594
КТП-13Б04	412,72	193,34	606,07	68,099
КТП-13Б05	460,63	280,97	741,60	62,113
КТП-13Б06	215,50	107,70	323,21	66,677
КТП-13Б07	446,06	220,61	666,67	66,909
КТП-13Б08	328,49	153,55	482,04	68,145
КТП-13Б09	214,23	95,60	309,83	69,146
КТП-13Б10	359,55	169,68	529,23	67,938
КТП-13Б12	262,84	121,50	384,34	68,388
КТП-13Б15	194,84	94,09	288,94	67,434
КТП-13Б16	76,91	40,89	117,81	65,287
КТП-0901	148,83	66,39	215,22	69,152
КТП-0902	429,50	196,61	626,11	68,598
КТП-0903	265,15	120,55	385,70	68,746
КТП-0904	369,13	164,04	533,17	69,234
КТП-0905	335,28	145,84	481,13	69,687
КТП-0906	236,80	106,54	343,34	68,969
КТП-0907	278,74	126,02	404,76	68,866
КТП-0908	18,34	10,68	29,03	63,194
КТП-0909	357,33	151,38	508,71	70,242

Продолжение таблицы Б.3

Объект	$P_{\text{полезн, кВт}}$	$P_{\text{потери, кВт}}$	$P_{\text{полная, кВт}}$	КПД, %
КТП-0910	195,31	95,65	290,96	67,125
КТП-0911	259,69	130,31	390,00	66,586
КТП-0912	454,69	207,69	662,39	68,644
КТП-0913	564,76	255,70	820,46	68,834
КТП-0914	463,60	207,54	671,14	69,076
КТП-0916	232,34	99,86	332,20	69,939
КТП-1801	42,80	19,56	62,36	68,630
КТП-1802	313,52	148,18	461,70	67,905
КТП-1803	252,24	118,99	371,23	67,946
КТП-1804	294,41	137,79	432,20	68,119
КТП-1807	386,59	182,70	569,28	67,907
КТП-1812	376,50	164,78	541,28	69,557
КТП-1813	186,54	95,97	282,51	66,028
КТП-1816	467,92	231,04	698,96	66,945
КТП-1818	68,17	30,36	98,53	69,190
КТП-1819	398,90	184,91	583,81	68,327
КТП-1820	582,67	268,87	851,54	68,426
КТП-1822	264,49	120,91	385,40	68,627
КТП-1823	234,30	110,48	344,78	67,958
КТП-1824	172,37	77,58	249,95	68,962
КТП-1825	252,90	109,13	362,03	69,855
КТП-1826	341,38	164,25	505,63	67,515
КТП-1827	318,20	142,74	460,94	69,034
КТП-1828	345,70	151,10	496,81	69,586
КТП-1829	1198,97	519,92	1718,89	69,753
КТП-1831	504,89	233,16	738,04	68,409
КТП-1838	671,67	296,83	968,50	69,352
КТП-1844	401,63	178,65	580,29	69,213
КТП-1845	254,55	112,32	366,87	69,385
КТП-1846	293,93	139,58	433,50	67,803
КТП-1847	196,60	97,82	294,41	66,776
КТП-1848	330,09	157,11	487,21	67,752

Окончание таблицы Б.3

Объект	$P_{\text{полезн, кВт}}$	$P_{\text{потери, кВт}}$	$P_{\text{полная, кВт}}$	КПД, %
КТП-1849	418,14	180,40	598,54	69,860
КТП-1850	330,82	149,72	480,54	68,843
КТП-2201	203,77	88,75	292,52	69,661
КТП-2202	118,92	51,98	170,90	69,585
КТП-2203	334,28	183,30	517,58	64,585
КТП-2204	574,76	260,41	835,17	68,819
КТП-2205	424,48	201,45	625,94	67,816
КТП-2206	392,77	176,61	569,38	68,981
КТП-2207	300,03	135,39	435,42	68,906
КТП-2208	237,33	108,81	346,15	68,564
КТП-2209	159,66	83,83	243,49	65,572
КТП-2210	193,08	103,73	296,81	65,052
КТП-2215	370,26	165,04	535,30	69,169
КТП-2218	245,04	116,00	361,04	67,870
КТП-2219	439,05	183,09	622,13	70,571
КТП-2220	482,12	225,78	707,90	68,105
КТП-2221	383,41	164,77	548,19	69,942
КТП-2222	296,50	142,00	438,50	67,616
КТП-2223	367,33	181,38	548,71	66,945
КТП-2224	216,09	97,87	313,96	68,827
КТП-2225	482,31	233,53	715,84	67,377
КТП-2226	386,18	172,01	558,19	69,184
КТП-2227	455,08	221,38	676,46	67,273
КТП-2228	335,67	167,57	503,24	66,703

Таблица Б.4 – Результаты расчета потерь на КТП ПС Родыгинская

Объект	$P_{\text{полезн, кВт}}$	$P_{\text{потери, кВт}}$	$P_{\text{полная, кВт}}$	КПД, %
КТП-0201	353,40	167,92	521,32	67,790
КТП-0202	677,36	303,37	980,73	69,067
КТП-0203	487,28	220,54	707,82	68,842
КТП-0204	126,72	64,96	191,68	66,108
КТП-0205	339,98	183,88	523,86	64,899
КТП-0206	339,54	151,65	491,19	69,126
КТП-0207	307,60	143,31	450,91	68,217
КТП-0208	118,37	52,83	171,20	69,141
КТП-0209	104,29	45,04	149,33	69,838
КТП-0211	17,12	7,63	24,75	69,180
КТП-0212	261,77	126,40	388,16	67,437
КТП-0215 (в системе ОИС называется КТП-1015)	459,86	210,22	670,09	68,627
КТП-0216	515,18	237,34	752,52	68,460
КТП-0217	299,04	143,98	443,01	67,501
КТП-0701	628,22	286,71	914,94	68,663
КТП-1001	347,46	155,48	502,94	69,086
КТП-1003	706,96	394,74	1101,70	64,170
КТП-1004	289,38	126,95	416,33	69,507
КТП-1005	142,52	66,82	209,34	68,081
КТП-1006	255,94	113,24	369,17	69,327
КТП-1007	452,92	205,01	657,93	68,840
КТП-1009 (0213)	387,17	177,75	564,92	68,535
КТП-1010	107,91	69,62	177,54	60,783
КТП-1011	267,51	124,19	391,69	68,295
КТП-1012	258,91	130,42	389,33	66,502
КТП-1013	50,84	22,03	72,87	69,770
КТП-1014	366,06	163,55	529,61	69,119
КТП-1017	338,42	150,74	489,16	69,184
КТП-1201	385,43	181,87	567,29	67,941
КТП-1202	236,97	113,56	350,52	67,603
КТП-1203	514,29	229,16	743,44	69,176

Окончание таблицы Б.4

Объект	$P_{\text{полезн, кВт}}$	$P_{\text{потери, кВт}}$	$P_{\text{полная, кВт}}$	КПД, %
КТП-1204	608,05	404,58	1012,63	60,047
КТП-1205	24,15	10,94	35,09	68,833
КТП-1206	652,64	286,55	939,20	69,489
КТП-1207	515,30	240,36	755,66	68,192
КТП-1208	348,31	165,28	513,59	67,818
КТП-1209	171,04	88,26	259,30	65,963
КТП-1210	150,00	66,66	216,67	69,232
КТП-1211	185,92	92,87	278,79	66,690
КТП-1212	298,42	138,17	436,59	68,353
КТП-1213	652,99	290,38	943,36	69,219
КТП-1214	264,43	117,39	381,83	69,255
КТП-1501	600,71	258,85	859,56	69,886
КТП-1601	396,64	198,63	595,27	66,632
КТП-1602	242,20	108,81	351,01	69,000
КТП-1603	696,41	311,05	1007,46	69,125
КТП-1604	291,97	124,00	415,98	70,190
КТП-1605	231,29	105,01	336,31	68,775
КТП-1606	312,17	140,66	452,83	68,938
КТП-1607	307,23	142,90	450,13	68,254
КТП-1608	192,40	94,86	287,25	66,978
КТП-1609	150,00	70,57	220,57	68,007
КТП-1610	455,76	191,61	647,37	70,402
КТП-1611	529,46	258,79	788,26	67,169

Таблица Б.5 – Результаты расчета потерь на КТП ПС Уньва

Объект	$P_{\text{полезн, кВт}}$	$P_{\text{потери, кВт}}$	$P_{\text{полная, кВт}}$	КПД, %
КТП-0201	431,33	205,19	636,52	67,764
КТП-0202	126,74	63,95	190,69	66,465
КТП-0203	273,58	129,54	403,12	67,866
КТП-0204	449,49	189,66	639,15	70,326
КТП-0205	440,22	194,98	635,20	69,304
КТП-0206	207,19	86,53	293,73	70,539
КТП-0207	277,21	140,38	417,58	66,383
КТП-0208	463,22	212,69	675,91	68,533
КТП-0210	672,33	309,16	981,49	68,501
КТП-0211	253,12	108,89	362,02	69,921
КТП-0212	127,07	59,23	186,30	68,209
КТП-0301	136,55	66,83	203,38	67,139
КТП-0302	382,68	176,37	559,05	68,452
КТП-0303	336,88	161,93	498,82	67,537
КТП-0304	171,94	81,19	253,13	67,924
КТП-0305	296,05	152,41	448,46	66,014
КТП-0306	384,05	172,94	556,99	68,951
КТП-0307	126,74	59,43	186,17	68,079
КТП-0309	238,39	128,05	366,44	65,055
КТП-0701	507,93	257,90	765,83	66,324
КТП-0801	206,66	91,59	298,24	69,291
КТП-0802	381,56	192,76	574,32	66,437
КТП-0803	408,15	187,35	595,50	68,539
КТП-0804	146,21	63,72	209,93	69,646
КТП-0805	460,23	207,93	668,16	68,881
КТП-0806	318,50	146,24	464,74	68,533
КТП-0807	230,50	109,09	339,59	67,876
КТП-0808	97,83	73,14	170,96	57,221
КТП-0809	228,97	98,75	327,72	69,868
КТП-0810	307,54	140,85	448,39	68,588
КТП-1303	152,85	78,96	231,81	65,937
КТП-1304	446,33	198,77	645,10	69,187

Продолжение таблицы Б.5

Объект	$P_{\text{полезн, кВт}}$	$P_{\text{потери, кВт}}$	$P_{\text{полная, кВт}}$	КПД, %
КТП-1305	11,31	6,55	17,86	63,337
КТП-1306	522,13	247,63	769,76	67,830
КТП-1307	666,28	296,86	963,14	69,178
КТП-1308	331,51	153,04	484,55	68,416
КТП-1309	565,75	246,45	812,20	69,656
КТП-1310	181,09	82,20	263,29	68,781
КТП-1312	9,63	4,34	13,97	68,954
КТП-1901	159,88	71,97	231,85	68,958
КТП-1902	224,69	117,99	342,68	65,570
КТП-1903	11,31	6,55	17,86	63,331
КТП-1904	2543,47	1121,37	3664,84	69,402
КТП-1905	132,68	63,89	196,57	67,495
КТП-2202	561,89	288,61	850,50	66,066
КТП-2401	357,80	146,43	504,22	70,960
КТП-2402	349,81	153,98	503,78	69,436
КТП-2403	242,03	249,88	491,91	49,203
КТП-2404	604,39	270,00	874,39	69,121
КТП-2405	285,14	125,49	410,63	69,440
КТП-2406	684,67	311,11	995,78	68,757
КТП-2407	177,21	83,47	260,68	67,980
КТП-2408	532,75	271,61	804,36	66,233
КТП-2409	522,25	237,26	759,51	68,761
КТП-2410	243,27	113,16	356,43	68,253
КТП-2411	295,96	141,25	437,21	67,693
КТП-2415	467,84	193,48	661,32	70,744
КТП-2416	311,43	148,35	459,78	67,735
КТП-2417	323,46	147,25	470,72	68,717
КТП-2601	30,57	16,78	47,35	64,557
КТП-2602	61,14	31,81	92,95	65,778
КТП-2603	48,91	24,90	73,81	66,265
КТП-2604	48,91	23,59	72,51	67,460
КТП-2605	138,81	59,51	198,33	69,993

Окончание таблицы Б.5

Объект	$P_{\text{полезн, кВт}}$	$P_{\text{потери, кВт}}$	$P_{\text{полная, кВт}}$	КПД, %
КТП-2606	255,78	112,29	368,07	69,492
КТП-2607	280,05	117,38	397,43	70,465
КТП-2608	143,53	66,41	209,94	68,368
КТП-2609	230,23	87,95	318,18	72,359
КТП-2701	90,67	47,25	137,92	65,739
КТП-2702	238,69	107,72	346,41	68,904
КТП-2703	330,67	148,10	478,78	69,066
КТП-2704	286,76	151,21	437,97	65,474
КТП-2705	211,30	100,74	312,04	67,715
КТП-2706	267,49	118,96	386,45	69,218
КТП-2707	226,85	110,30	337,15	67,285
КТП-2708	381,76	180,32	562,08	67,919
КТП-2709	691,36	320,21	1011,57	68,345
КТП-2710	213,77	96,10	309,87	68,986
КТП-2711	552,26	246,83	799,09	69,111
КТП-2746	236,82	105,23	342,05	69,235
КТП-2749	75,81	33,94	109,75	69,079

Приложение В. Сведения о погрешностях измерений оборудования, используемого на лабораторных стендах

Погрешности измерений измерителя мощности, установленного в модуле «Электрические машины» лабораторного стенда, представлены в таблице В.1.

Таблица В.1 – Погрешности измерителя мощности, установленного в модуле «Электрические машины»

Параметр	Диапазон измерения	Погрешность измерений
Напряжение, В	32...640	0,15%
Ток, А	0,05...20	0,15%
Частота, Гц	40...400	$\pm 0,2 \%$
Активная мощность, Вт	—	$\pm 0,3 \%$
Коэффициент мощности	—	$\pm 0,3 \%$
Полная мощность, ВА	—	$\pm 0,3 \%$
Реактивная мощность, ВАр	—	$\pm 0,3 \%$

Погрешности измерений блока измерительных трансформаторов БИТ-3, установленного на лабораторном стенде «Модель электрической системы», представлены в таблице В.2.

Таблица В.2 – Погрешности измерений блока измерительных трансформаторов БИТ-3, установленного на лабораторном стенде «Модель электрической системы»

Параметр	Значение
Частота измеряемых токов и напряжений, Гц	50 $\pm$ 1
Коэффициент трансформации: -трансформатора напряжения, В/В -трансформатора тока, А/В	600/3 0,3/3
Амплитуда измеряемого напряжения, В, не более	600
Амплитуда измеряемого тока в длительном режиме, А, не более	0,3
Амплитуда измеряемого тока в кратковременном (до 1,0 с) режиме, А, не более	10
Погрешность трансформаторов, %, не более	2,5

Погрешности измерений приборов, установленных на лабораторном стенде для оценки конвертации дебита ПНГ в электрическую мощность, представлены в таблице В.3.

Таблица В.3 – Погрешности измерений приборов на лабораторном стенде для оценки конвертации дебита ПНГ в электрическую мощность

Прибор	Параметр	Диапазон измерения	Погрешность измерений
Газоанализатор Optima-7	Температура, °C	200...650	1%
Ротаметр	Расход газа, л/мин	0...50	1,5%

Относительная ошибка с учетом верхней доверительной границы определяется по формуле:

$$\varepsilon_{\text{отн}} = \frac{x_{\text{В}} - \bar{x}}{\bar{x}}, \quad (1)$$

где $x_{\text{В}}$ – верхняя односторонняя доверительная граница, $\bar{x}$ – среднее значение измеряемой величины.

Относительная ошибка с учетом нижней доверительной границы определяется по формуле:

$$\varepsilon_{\text{отн}} = \frac{|x_{\text{Н}} - \bar{x}|}{\bar{x}}, \quad (2)$$

где $x_{\text{Н}}$ – нижняя односторонняя доверительная граница

При малом количестве замеров в эксперименте ($n < 30$) их необходимое количество определяется по формуле:

$$n = t^2 \cdot \left(\frac{V}{\varepsilon_{\text{отн}}} \right)^2, \quad (3)$$

где V – коэффициент вариации, %; t – стандартное значение критерия Стьюдента.

$$V = \frac{\sigma_x}{\bar{x}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где σ_x – среднее квадратичное отклонение, полученное по результатам предварительных измерений; $\bar{x}$ – среднее значение в предварительных измерениях

Результаты предварительных замеров для определения необходимого количества измерений представлены в таблицах В.4, В.5.

Таблица В.4 – Результаты предварительных замеров установившихся режимов

Режим	Параметр	Номер измерения							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1.1	$I_{возб}, A$	5,94	5,97	5,90	5,95	5,93	5,95	5,91	5,90
	$I_{статор}, A$	1,093	1,091	1,093	1,091	1,093	1,090	1,091	1,091
1.2	$I_{возб}, A$	6,13	6,12	6,14	6,18	6,11	6,09	6,08	6,08
	$I_{статор}, A$	1,186	1,184	1,183	1,187	1,188	1,186	1,185	1,189
1.3	$I_{возб}, A$	7,16	7,18	7,17	7,14	7,11	7,19	7,15	7,12
	$I_{статор}, A$	1,761	1,762	1,763	1,761	1,761	1,761	1,760	1,761
2.1	$I_{возб}, A$	7,11	7,10	7,07	7,11	7,05	7,11	7,11	7,12
	$I_{статор}, A$	1,542	1,544	1,543	1,545	1,541	1,542	1,543	1,542
2.2	$I_{возб}, A$	7,37	7,39	7,38	7,35	7,34	7,38	7,34	7,37
	$I_{статор}, A$	1,643	1,644	1,644	1,642	1,645	1,645	1,645	1,644

Таблица В.5 – Результаты предварительных замеров сценариев перехода

Сценарий	Параметр	Номер измерения							
		1	2	3	4	5	6	7	8
10	$I_{возб}, A$	5,78	5,85	5,76	5,76	5,75	5,84	5,85	5,77
	$I_{статор}, A$	1,076	1,086	1,026	1,106	1,046	1,016	1,006	1,096
11	$I_{возб}, A$	5,78	5,85	5,76	5,76	5,75	5,84	5,85	5,77
	$I_{статор}, A$	1,176	1,096	1,106	1,186	1,196	1,096	1,116	1,096
12	$I_{возб}, A$	5,99	5,91	5,91	5,92	5,98	5,91	5,99	5,90
	$I_{статор}, A$	1,208	1,118	1,198	1,138	1,138	1,168	1,168	1,138
13	$I_{возб}, A$	5,96	5,92	5,94	5,99	5,90	5,99	5,94	5,95
	$I_{статор}, A$	1,685	1,675	1,685	1,705	1,625	1,625	1,645	1,695
14	$I_{возб}, A$	6,10	6,09	6,08	6,11	6,12	6,16	6,09	6,14
	$I_{статор}, A$	1,548	1,578	1,528	1,618	1,538	1,578	1,598	1,548
15	$I_{возб}, A$	6,15	6,17	6,13	6,10	6,17	6,17	6,13	6,11
	$I_{статор}, A$	1,070	1,110	1,100	1,080	1,140	1,080	1,050	1,090
16	$I_{возб}, A$	6,09	6,05	6,14	6,12	6,13	6,14	6,10	6,12
	$I_{статор}, A$	1,148	1,128	1,168	1,078	1,078	1,118	1,098	1,168
17	$I_{возб}, A$	6,86	6,84	6,82	6,83	6,81	6,87	6,82	6,77
	$I_{статор}, A$	1,538	1,468	1,538	1,548	1,488	1,518	1,518	1,558
18	$I_{возб}, A$	6,99	7,04	6,98	7,04	7,07	6,98	7,03	7,05
	$I_{статор}, A$	1,565	1,565	1,535	1,545	1,525	1,585	1,515	1,505

Окончание таблицы В.5

19	$I_{возб}, A$	7,15	7,09	7,08	7,08	7,16	7,16	7,09	7,13
	$I_{статор}, A$	1,575	1,565	1,565	1,635	1,645	1,615	1,575	1,595
20	$I_{возб}, A$	7,06	7,15	7,14	7,12	7,12	7,11	7,11	7,09
	$I_{статор}, A$	1,531	1,551	1,541	1,491	1,511	1,521	1,531	1,511
21	$I_{возб}, A$	7,33	7,32	7,39	7,33	7,35	7,32	7,40	7,39
	$I_{статор}, A$	1,512	1,522	1,522	1,502	1,522	1,532	1,472	1,492
22	$I_{возб}, A$	7,36	7,34	7,33	7,42	7,34	7,34	7,40	7,32
	$I_{статор}, A$	1,518	1,508	1,468	1,548	1,538	1,548	1,458	1,548

На основании обработки данных предварительных замеров получены следующие результаты (таблицы В.6, В.7).

Таблица В.6 – Результаты обработки замеров установившихся режимов

Режим	Среднее значение, $\bar{x}$		Среднеквадратическое отклонение, σ		V		n	
	$I_{возб}, A$	$I_{статор}, A$	$I_{возб}, A$	$I_{статор}, A$	$I_{возб}, A$	$I_{статор}, A$	$I_{возб}, A$	$I_{статор}, A$
1.1	5,93	1,092	0,021	0,001	0,004	0,001	0,417	0,363
1.2	6,12	1,186	0,026	0,002	0,004	0,001	0,473	0,226
1.3	7,15	1,761	0,023	0,001	0,003	0,000	0,253	0,226
2.1	7,10	1,543	0,019	0,001	0,003	0,001	0,141	0,295
2.2	7,37	1,644	0,016	0,001	0,002	0,000	0,381	0,127

Таблица В.7 – Результаты обработки замеров сценариев перехода

Сценарий	Среднее значение, $\bar{x}$		Среднеквадратическое отклонение, σ		V		n	
	$I_{возб}, A$	$I_{статор}, A$	$I_{возб}, A$	$I_{статор}, A$	$I_{возб}, A$	$I_{статор}, A$	$I_{возб}, A$	$I_{статор}, A$
10	5,80	1,057	0,039	0,034	0,007	0,032	0,669	0,391
11	5,80	1,134	0,039	0,039	0,007	0,035	0,669	0,995
12	5,94	1,159	0,036	0,026	0,006	0,023	0,776	0,365
13	5,95	1,668	0,024	0,027	0,004	0,016	0,214	0,361
14	6,11	1,567	0,022	0,026	0,004	0,017	0,430	0,414
15	6,14	1,090	0,024	0,020	0,004	0,018	0,299	0,226
16	6,11	1,123	0,023	0,030	0,004	0,027	0,132	0,401
17	6,83	1,522	0,023	0,024	0,003	0,016	0,138	0,176
18	7,02	1,543	0,029	0,023	0,004	0,015	0,431	0,325
19	7,12	1,596	0,033	0,027	0,005	0,017	0,678	0,652
20	7,11	1,524	0,020	0,015	0,003	0,010	0,131	0,192
21	7,35	1,510	0,030	0,016	0,004	0,010	0,698	0,157
22	7,36	1,517	0,028	0,029	0,004	0,019	0,531	0,221

Анализ результатов обработки данных предварительных замеров показывает, что для построения карты сценариев электрических режимов достаточно сделать по одному замеру отслеживаемых величин для каждого сценария перехода.

**Приложение Г. Систематизированные данные на основе анализа
возможности внедрения объектов распределенной генерации на
месторождениях Пермского края**

Таблица Г.1 – Систематизированные данные на основе анализа возможности внедрения объектов распределенной генерации на месторождениях Пермского края

ЦДНГ	Месторождение	Объем ПНГ в год, тыс. м3	Эквивалент мощности ГТЭС*, кВт	Планируемая нагрузка, кВт	Расстояние от месторождения до нагрузки, км	Питание
1	Павловское	40 000	10 811	150	2,00	Населенный пункт
3	Шагиртско-Гожанское	16 000	4 324	1 400	2,00	Населенный пункт
4	Пихтовое	2 000	541	250	3,00	Населенный пункт
4	Полазненское	1 400	378	800	2,00	Населенный пункт
5	Рассветное	6 000	1 622	60	3,60	Населенный пункт
5	Осинское	5 500	1 486	450	3,00	Населенный пункт
6	Сыповское	2 600	703	1 500	2,00	Населенный пункт
10	Кокуйское	60 000	16 216	2 500	2,75	Населенный пункт
10	Сосновское	2 400	649	650	3,70	Населенный пункт
10	Ильичевское	16 000	4 324	600	3,50	Населенный пункт
11	Сибирское	100 000	27 027	1 000	3,00	Садоводческое, некоммерческое товарищество
				530	2,00	ДНС
11	Уньвинское	220 000	59 459	1 300	3,50	Населенный пункт
				200	2,00	Объекты технологического процесса
12	Логовское	6 000	1 622	75	3,00	Профилакторий
				387	0	Нефтегазосборный пункт
12	Чашкинское	14 500	3 919	275	2,00	Населенный пункт
				875	0	ДНС

*Предполагается, что объекты генерации вырабатывают данную мощность круглосуточно в течение года

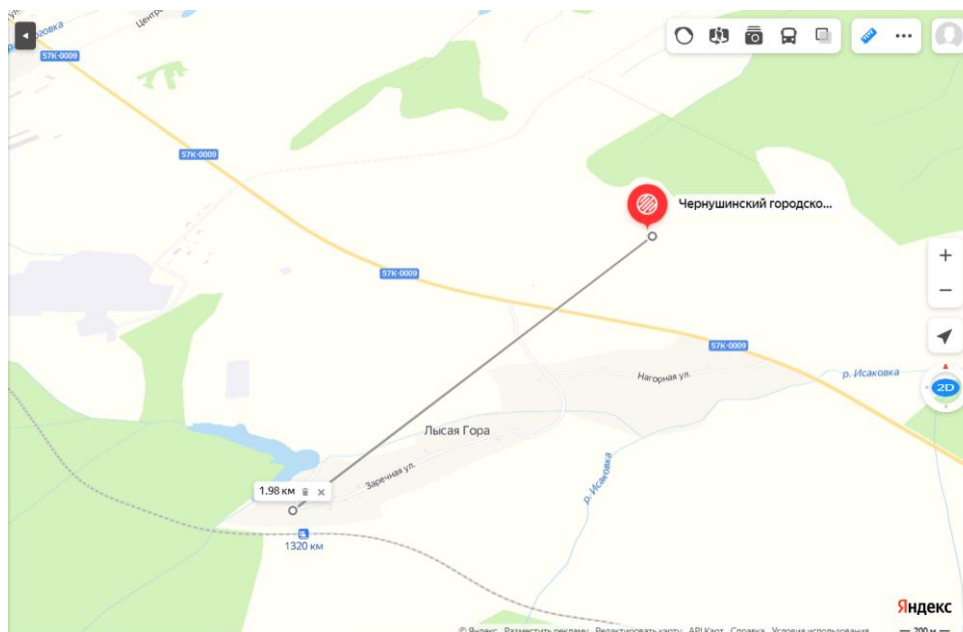


Рисунок Г.1 – Картографический снимок Павловского месторождения
 ЦДНГ – 1 (объем добычи ПНГ – 40, 000 тыс м³ в год) Координаты: Широта:
 56.481944, Долгота: 56.267222, <https://energybase.ru/oil-gas-field/pavlovskoye>
 Питание деревни Лысая Гора – 150 кВт, 2 км

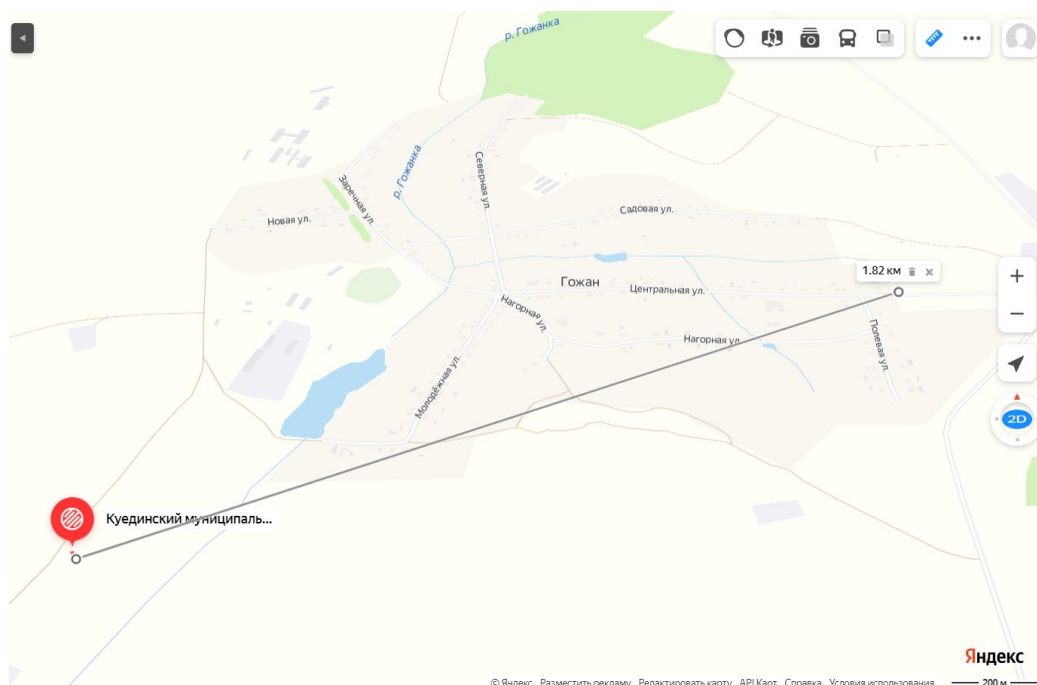


Рисунок Г.2 – Картографический снимок Шагиртско-Гожанского
 месторождения ЦДНГ – 3 (объем добычи ПНГ – 16, 000 тыс м³ в год)
 Широта: 56.516944 Долгота: 55.185556 <https://energybase.ru/oil-gas-field/shagirt-gozhanskoe> Питание деревни Гожан - 1,400 кВт (2 км)

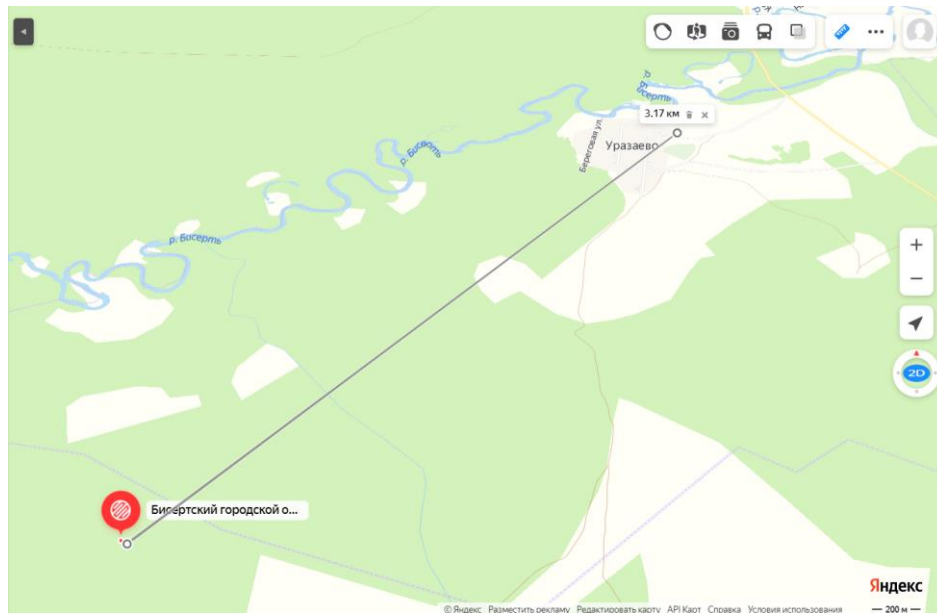


Рисунок Г.3 – Картографический снимок Пихтового месторождения
ЦДНГ – 4 (объем добычи ПНГ – 2, 000 тыс м³ в год) Широта: 56.921944
Долгота: 58.809722 <https://energybase.ru/oil-gas-field/pihtovoye-perm>
Питание деревни Уразаево - 250 кВт (3 км)

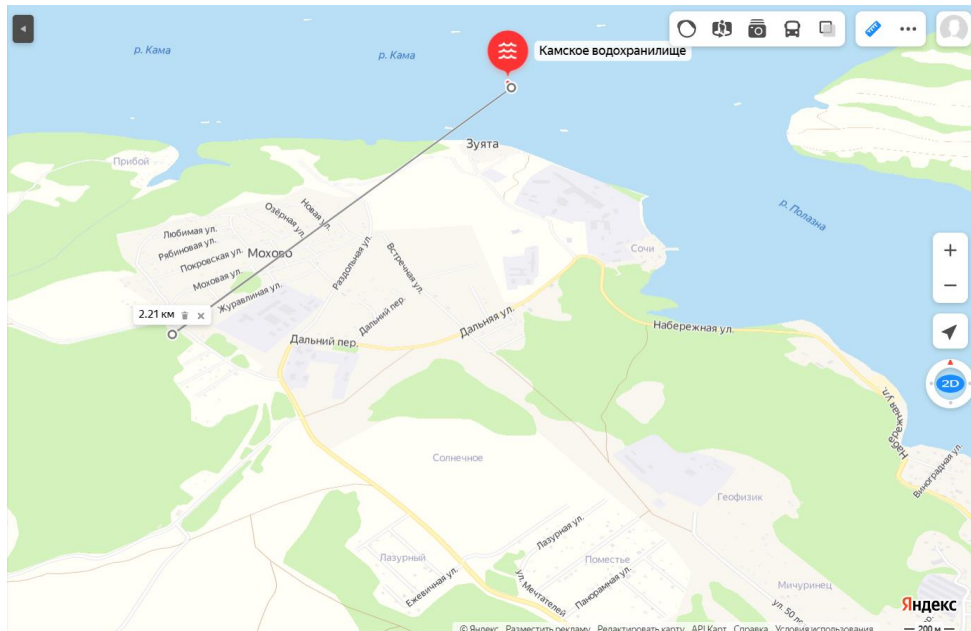


Рисунок Г.4 – Картографический снимок Полазненского месторождения
ЦДНГ 4 (объем добычи ПНГ – 1, 400 тыс м³ в год) Широта: 58.330278,
Долгота: 56.376389 <https://energybase.ru/oil-gas-field/polaznenskoye>
Питание деревни Зуята - 75 кВт, деревня Мохово (2 км) – 725 кВт (улица
Раздольная – 125 кВт, улица Покровская – 600 кВт)

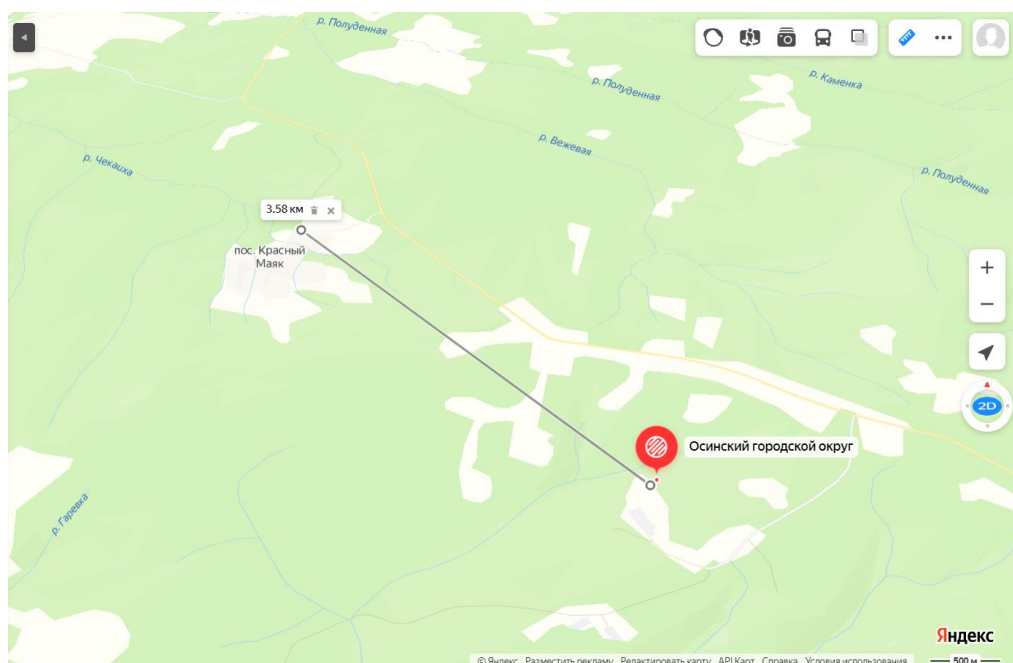


Рисунок Г.5 – Картографический снимок Рассветного месторождения
ЦДНГ- 5 (объем добычи ПНГ – 6, 000 тыс м³ в год) Широта: 57.395499
Долгота: 55.795397 <https://energybase.ru/oil-gas-field/rassvetnoe>

Питание поселка Красный Маяк – 60 кВт, (3,6 км)

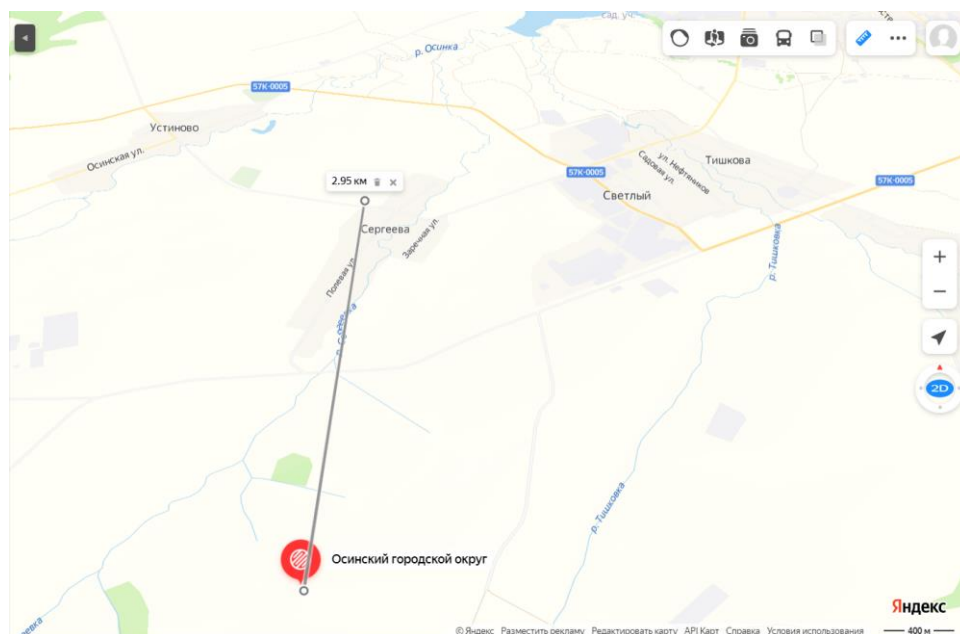


Рисунок Г.6 – Картографический снимок Осинского месторождения
ЦДНГ-5 (5, 500 тыс м³ ПНГ в год) Широта: 57.224722, Долгота: 55.390278
<https://energybase.ru/oil-gas-field/osinskoye> Питание деревни Сергеева – 450
кВт, (3км) улица Заречная -75кВт, улица Полевая – 375 кВт

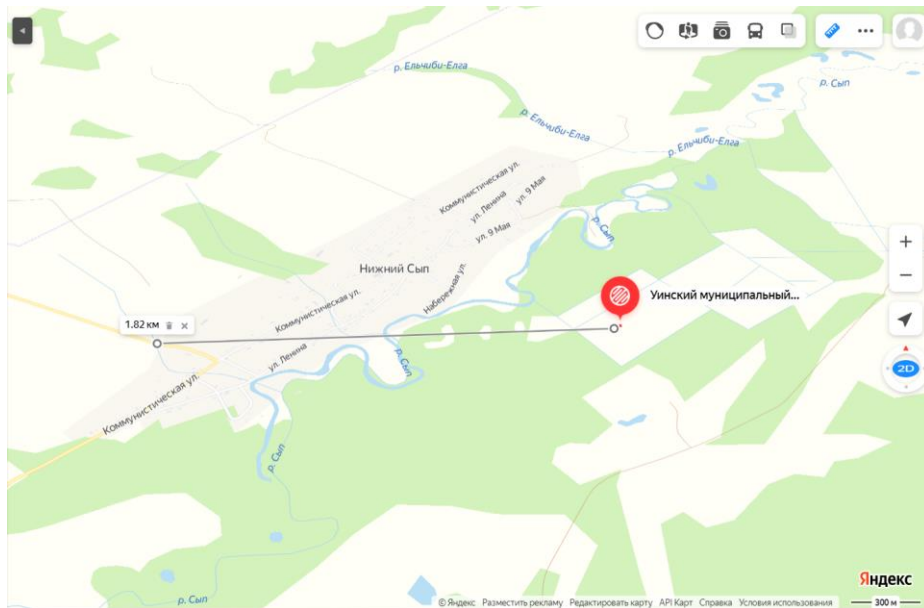


Рисунок Г.7 – Картографический снимок Сыповского месторождения
 ЦДНГ-6 (объем добычи ПНГ – 2, 600 тыс м³ в год) Широта: 56.966407
 Долгота: 56.586349 <https://energybase.ru/oil-gas-field/sypovskoye> Питание села
 Нижний сып – 1,5 МВт, (2 км) улица Набережная – 55 кВт, улица 9 мая – 200
 кВт, улица Коммунистическая – 450 кВт, улица Ленина – 750 кВт

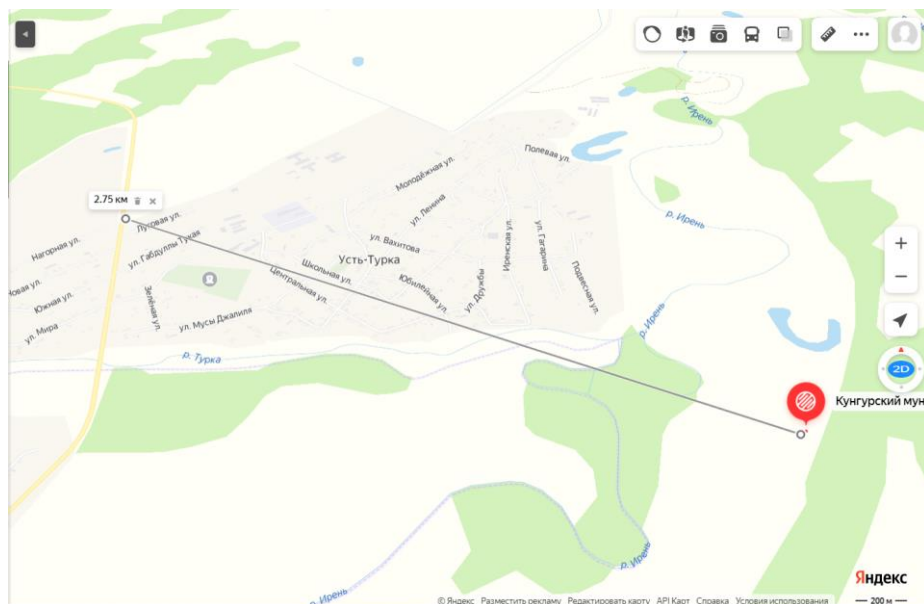


Рисунок Г.8 – Картографический снимок Кокуйского месторождения
 ЦДНГ-10 (объем добычи ПНГ – 60, 000 тыс м³ в год) Широта: 57.207778
 Долгота: 56.616389 <https://energybase.ru/oil-gas-field/kokuiskoe>
 Питание села Усть-Турка – 2,500 кВт (2,75 км)

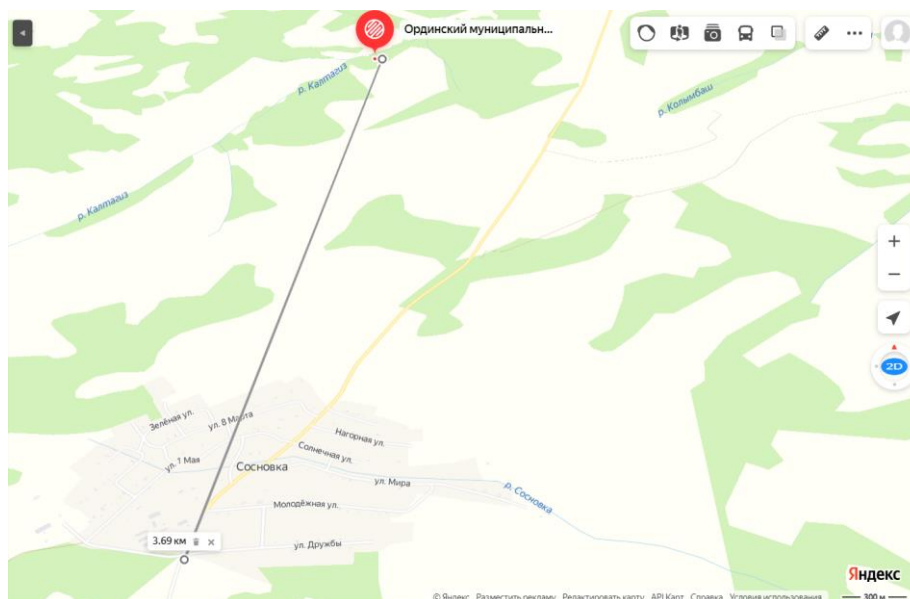


Рисунок Г.9 – Картографический снимок Сосновского месторождения
ЦДНГ – 10 (объем добычи ПНГ – 2,400 тыс м³ в год) Широта: 57.080278,
Долгота: 56.474722 <https://energybase.ru/oil-gas-field/sosnovskoye>
Питание села Сосновка - 650 кВт (3,7 км)

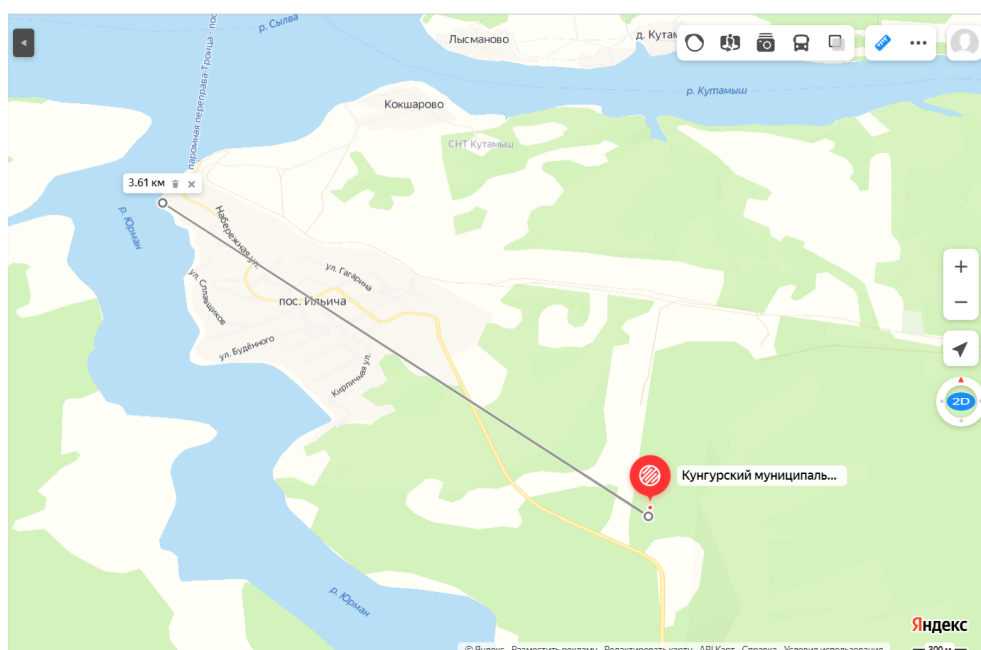


Рисунок Г.10 – Картографический снимок Ильичевского месторождения
ЦДНГ-10 (объем добычи ПНГ – 16, 000 тыс м³ в год) Широта:57.936771;
Долгота:56.842918 <https://energybase.ru/oil-gas-field/illichivskoe>
Питание посёлка Ильича – 600 кВт, (3,5 км) улица Советская – 350 кВт,
улица Набережная – 250 кВт

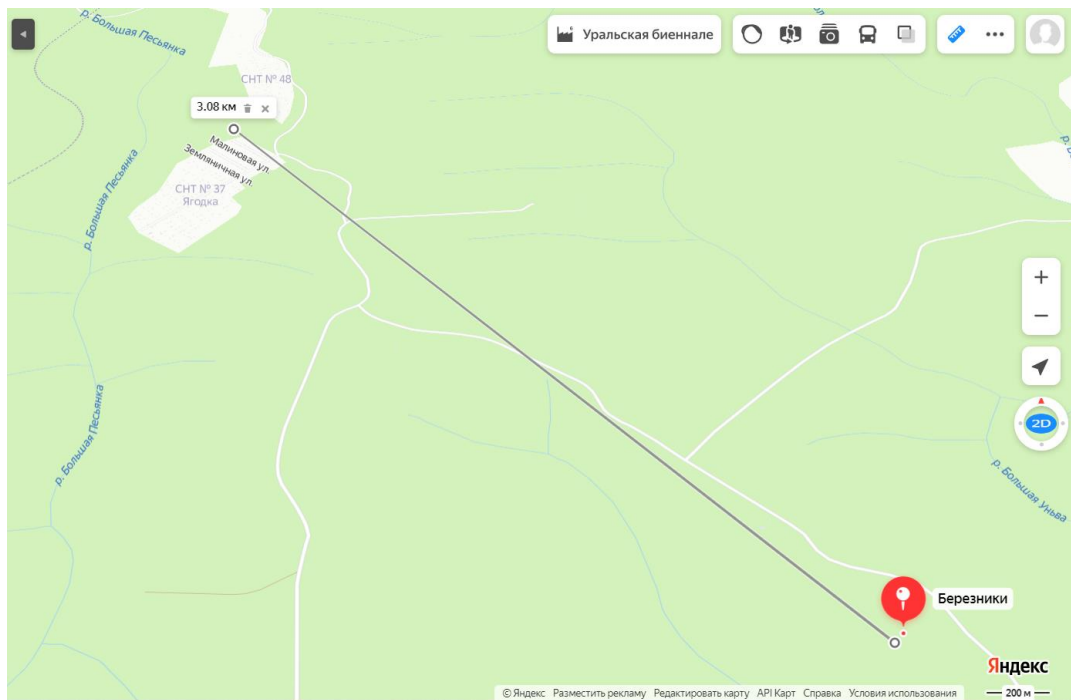


Рисунок Г.11 - Картографический снимок Сибирского месторождения ЦДНГ-11 (объем добычи ПНГ – 100, 000 тыс м³ в год) Широта: 59.275000, Долгота:

56.984722 <https://energybase.ru/oil-gas-field/sibirskoe>

Питание СНТ №37 и СНТ №48 – 1,000 кВт, (3 км)

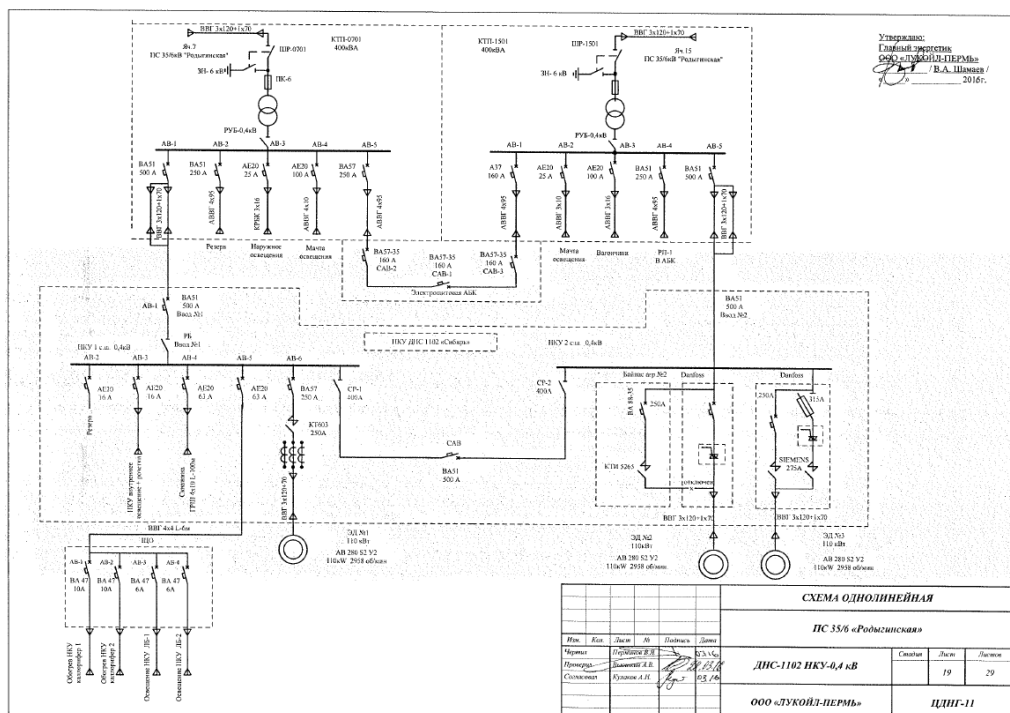


Рисунок Г.12 – Однолинейная схема ДНС «Сибирь» Сибирского месторождения, Насосы (330 кВт), Собственные нужды (200 кВт)

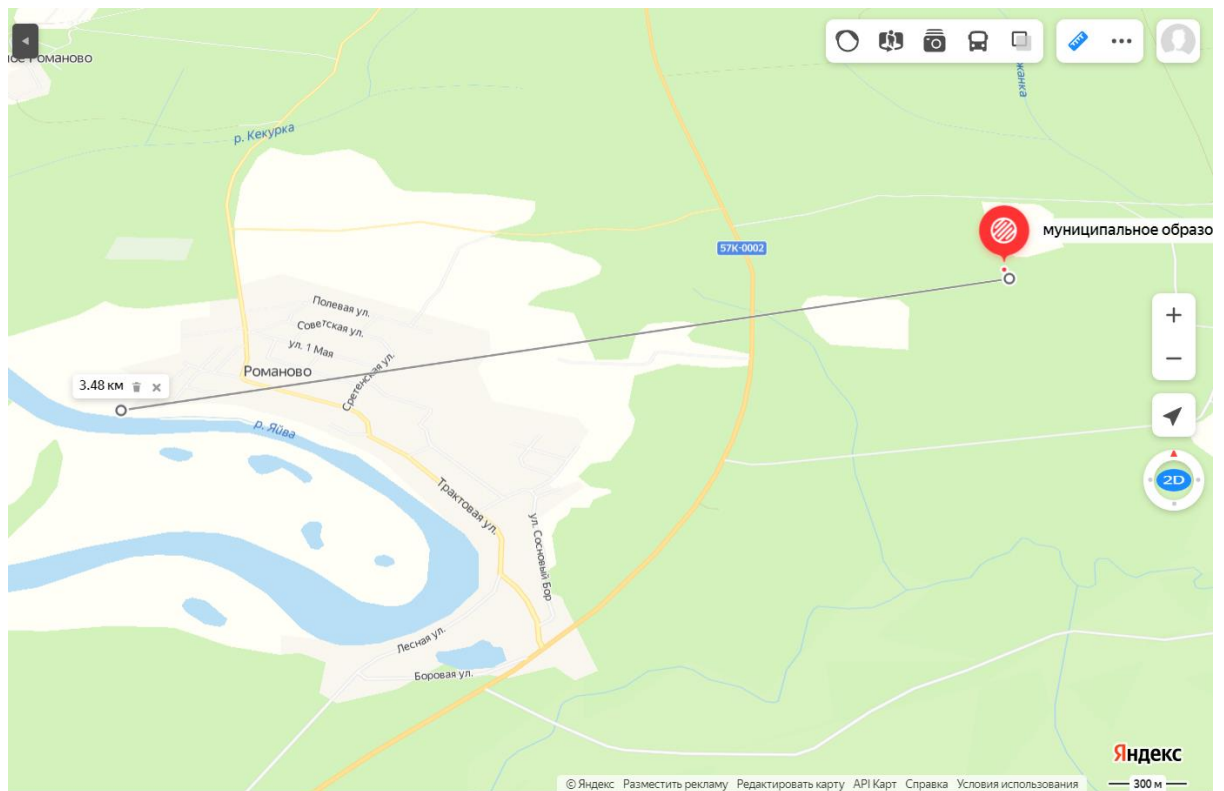


Рисунок Г.13 – Картографический снимок Уньвинского месторождения
ЦДНГ -11 (объем добычи ПНГ – 220, 000 тыс м³ в год) Широта: 59.164167,
Долгота: 56.827222 <https://energybase.ru/oil-gas-field/uunvinskoye>
Питание село Романово – 1,300 кВт (3,5 км)

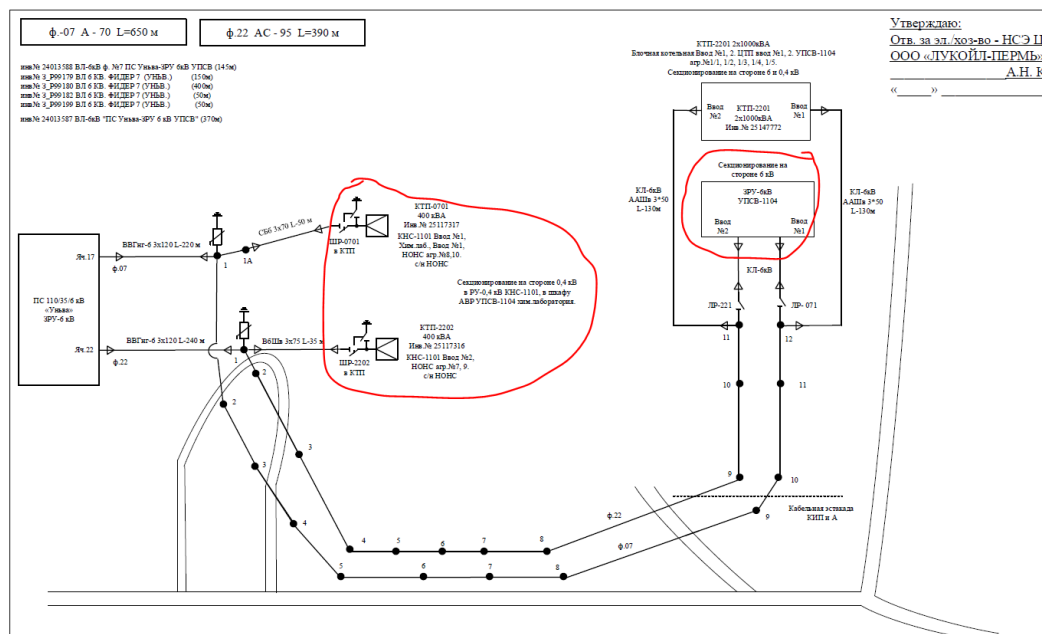


Рисунок Г.14 – Схема электроснабжения Уньвинского месторождения
Питание: КНС и УПСВ Уньвинского месторождения

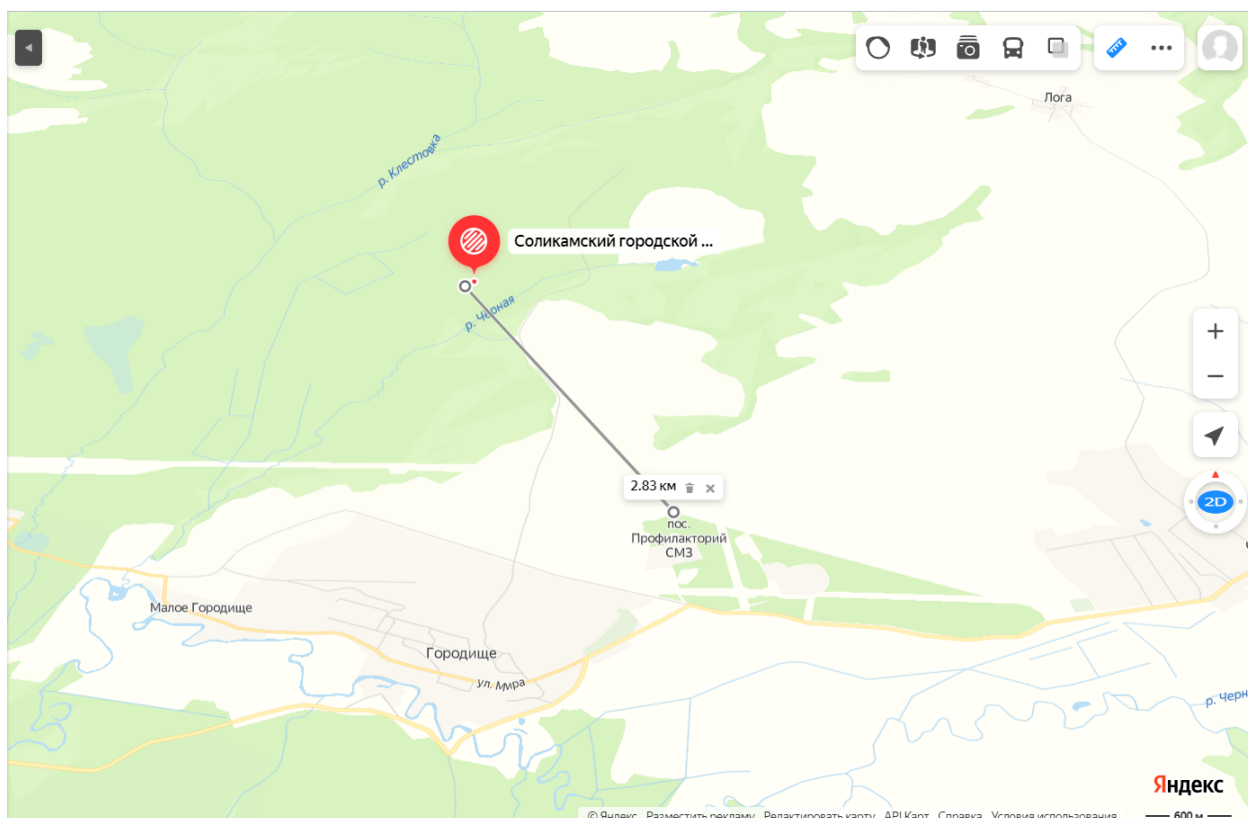


Рисунок Г.15 – Картографический снимок Логовского месторождения ЦДНГ-12 (объем добычи ПНГ – 6, 000 тыс м³ в год) Широта:59.701533, Долгота:56.855278 <https://energybase.ru/oil-gas-field/logovskoye>

Питание профилактория ОАО СМЗ – 75кВт (3км)

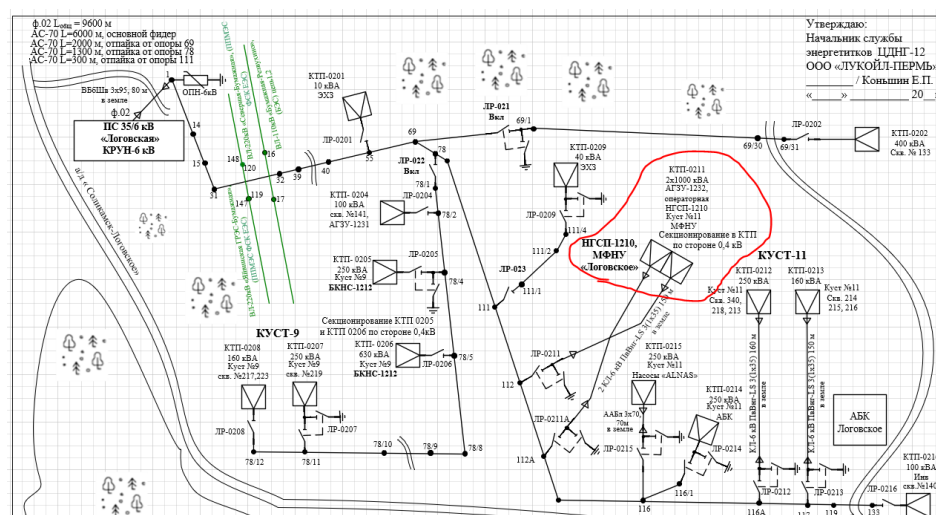


Рисунок Г.16 Схема электроснабжения Логовского месторождения

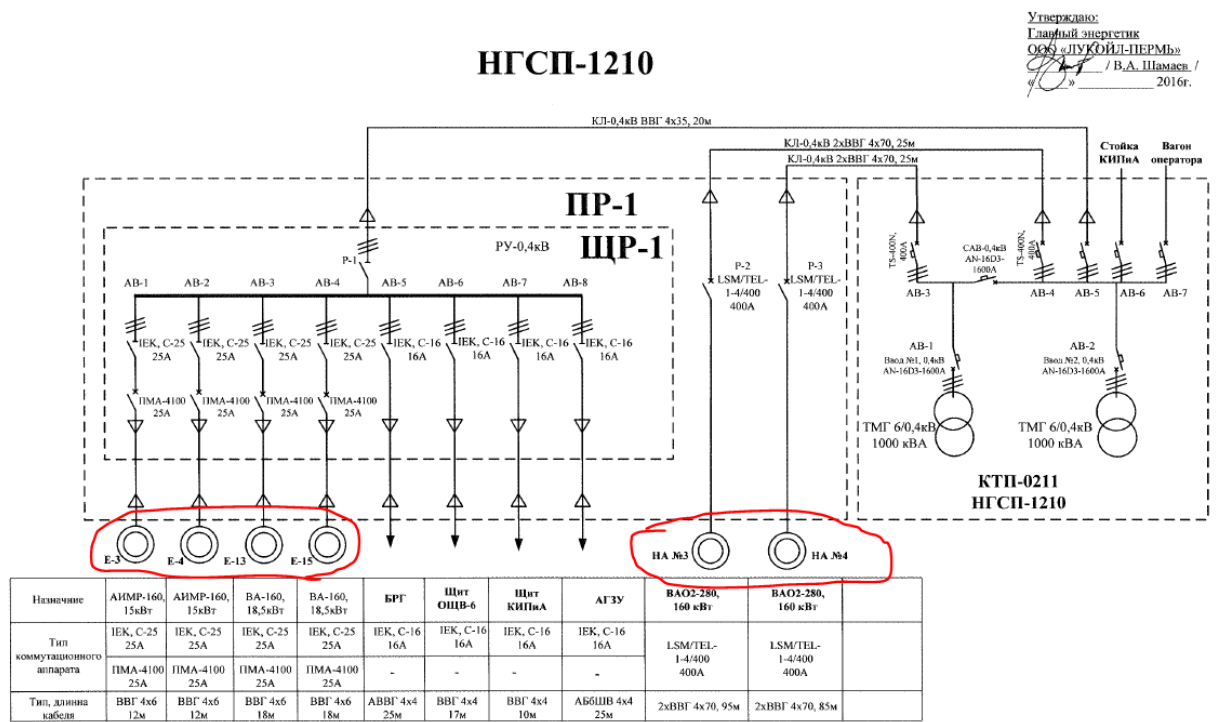


Рисунок Г.17 – Однолинейная схема Логовского месторождения
Питание НГСП-1210 Логовского месторождения: ЩР-1 - 67 кВт и 320 кВт

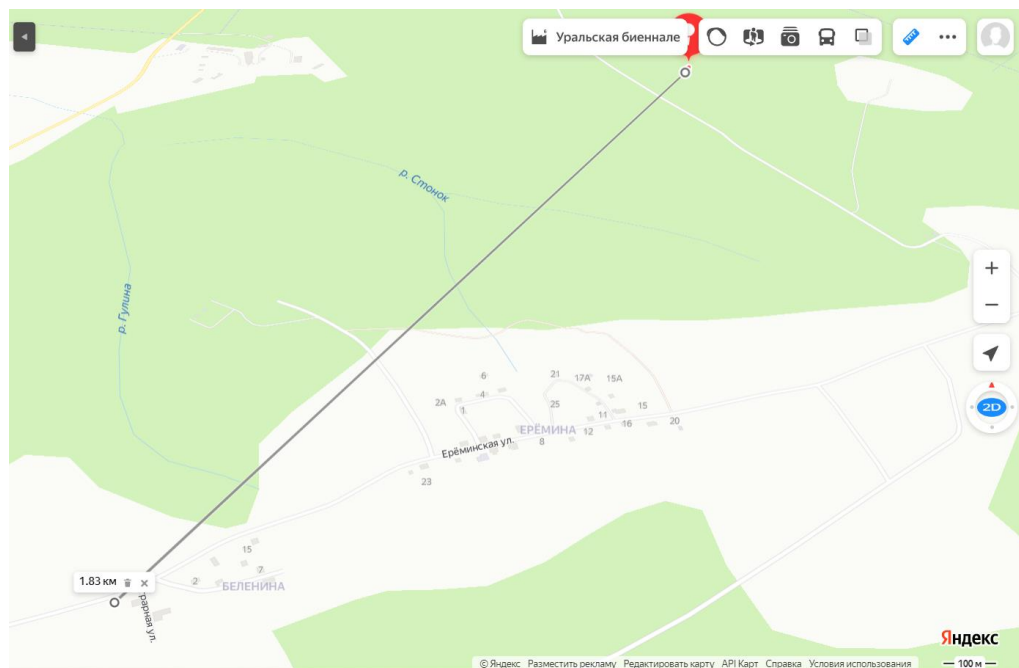


Рисунок Г.18 – Картографический снимок Чашкинское месторождения
ЦДНГ 12 (объем добычи ПНГ – 14, 500 тыс м³ в год) Широта:59.498889,
Долгота:56.904444 <https://energybase.ru/oil-gas-field/chashkinskoye>
Питание деревни Еремина - 200 кВт, деревня Беленина – 75 кВт (2 км)

Назначение	ТН-6 кВ №2	РЕЗЕРВ	2 КТПГ-250кВА 6/0,4кВ Т2	Насос внешнего транспорта №2 400кВт	БСК №2	Ввод-6кВ №2	Пр-ли ТСН-2	ТСН-2	СР-6кВ	СВ - 6кВ	Ввод-6кВ №1	Пр-ли ТСН-1	ТСН-1	БСК №1	Насос внешнего транспорта №1 400кВт	2 КТПГ-250кВА 6/0,4кВ Т1	РЕЗЕРВ	ТН-6 кВ №1
Тип выключателя	-	ВВ/ТЕЛ 1000/20	ВВ/ТЕЛ 1000/20	ВВ/ТЕЛ 1000/20	ВВ/ТЕЛ 1000/20	ВВ/ТЕЛ 1000/20	-	-	-	ВВ/ТЕЛ 1000/20	ВВ/ТЕЛ 1000/20	-	ВВ/ТЕЛ 1000/20	ВВ/ТЕЛ 1000/20	ВВ/ТЕЛ 1000/20	ВВ/ТЕЛ 1000/20	ВВ/ТЕЛ 1000/20	-
Тип ТТ, ТН	ЗНОЛП-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ЗНОЛП-10
Тип, длина кабеля	-	-	ПВВНГ 3х95 L-55м	ПВВНГ 3х95 L-500м	ПВВНГ 3х95 L-23м	-	-	-	-	-	-	-	-	ПВВНГ 3х95 L-25м	ПВВНГ 3х95 L-500м	ПВВНГ 3х95 L-23м	-	-

Рисунок Г.20 – Однолинейная схема Чашкинского месторождение, питание насосов внешнего транспорта – 800 кВт, питание собственных нужд НГСП – 75 кВт

Приложение Д. Свидетельство о государственной регистрации
программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023662754

Мультиагентная система управления
электротехническим комплексом
нефтегазодобывающего предприятия с распределенной
генерацией (Multi-agent control system with microgrid)

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет» (ПНИПУ) (RU)*

Авторы: *Павлов Николай Владимирович (RU), Петроченко
Антон Борисович (RU)*

Заявка № 2023662075

Дата поступления 14 июня 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 14 июня 2023 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 429b680fe3853164ba96f83b73b4aa7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 10.05.2023 по 02.08.2024

Ю.С. Зубов

Приложение Е. Акты внедрения результатов диссертационного исследования

**Министерство науки и высшего образования
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
ПЕРМСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
(ПНИПУ)**



УТВЕРЖДАЮ:

И. о. ректора,

д. ф. -м. н., профессор

А. А. Ташкинов

19» июля 2023 г.

А К Т

о внедрении в учебный процесс

Пермского национального исследовательского политехнического университета
результатов диссертационной работы Павлова Николая Владимировича
«Обеспечение баланса мощности в электрической сети нефтегазодобывающего
предприятия с объектами распределенной генерации, использующими
попутный нефтяной газ», представленной на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Мы, нижеподписавшиеся, декан электротехнического факультета, к.т.н., Черняев В.В., заместитель заведующего кафедрой «Микропроцессорные средства автоматизации», к.т.н., доцент Ромодин А.В. составили настоящий акт о том, что в учебный процесс кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации» внедрены результаты диссертационной работы Павлова Н.В. в части:

- мультиагентной модели электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия с объектами распределенной генерации;
- методики обеспечения баланса мощности в электрической сети нефтегазодобывающего предприятия с учетом использования попутного нефтяного газа для генерации электроэнергии.

Разработанные мультиагентная модель и методика обеспечения баланса мощности в электрической сети используются при проведении лабораторных и практических занятий по дисциплинам «Функциональное моделирование цифровизации промышленных предприятий» и «Компьютерные, сетевые и информационные технологии в электроэнергетике и электротехнике» при подготовке студентов по образовательным программам магистратуры 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника».

Декан
электротехнического факультета,
к.т.н.

В.В. Черняев

Заместитель заведующего кафедрой
«Микропроцессорные средства автоматизации»
к.т.н., доцент

А.В. Ромодин



GROUP
SPUTNIC
Компетенция в решениях

ООО «Спутник-Комплектация»

Адрес места нахождения: Н.Островского ул., зд 65, оф. 119-126, г.Пермь, Россия, 614007
Почтовый адрес: Рязанская ул., д.105, г.Пермь, Россия, 614990
Телефоны: +7 (342) 2-200-300, 226-44-44 Факс: +7 (342) 226-14-14
Электронная почта: post@sputnic.ru Сайт: www.sputnic.ru

Доп.офис: Карла Маркса ул., д.60, оф. 3, г.Березники, Россия, 618417
Телефон: +7 (3424) 22-98-65 Факс: +7 (3424) 23-61-66

УТВЕРЖДАЮ

Технический директор

Ю. А. Гагарин

«02» 2023 г.

А К Т

внедрения результатов диссертационной работы Павлова Н. В.
«Обеспечение баланса мощности в электрической сети нефтегазодобывающего предприятия с объектами распределенной генерации, использующими попутный нефтяной газ», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук

Мы, нижеподписавшиеся, Ческидов Эдуард Сергеевич, начальник проектно-конструкторского отдела, Шапранов Руслан Юрьевич, заместитель технического директора, составили настоящий акт о том, что группой предприятий «СПУТНИК» используются разработанные в ходе диссертационного исследования Павлова Н.В. мультиагентная модель электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия с объектами распределенной генерации и методика обеспечения баланса мощности в электрической сети предприятия с учетом использования попутного нефтяного газа для генерации электроэнергии.

Применение указанных результатов используется при проектировании технологических объектов предприятий минерально-сырьевой отрасли таких как ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ», ООО «ЛУКОЙЛ-Центрнефтепродукт», ОАО «НГК «Славнефть», ООО «Нефтяная компания Новый Поток», что позволяет обеспечить баланс мощности в электрической сети с учетом использования попутного нефтяного газа для генерации электроэнергии.

Начальник ПКО

Зам.технического директора



Э.С. Ческидов

Р.Ю. Шапранов

