

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

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»

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

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

Пермь – 2023

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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.

**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. Макклюева, Н. В. Коровкина, Е. Д. Фармера и др.

**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 с объектами распределенной генерации.

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

**Целью работы** является разработка мультиагентной модели электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия для обеспечения баланса мощности в электрической сети НГДП 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 объектами распределенной генерации малой и средней мощности.

**Основные научные положения и результаты, выносимые на защиту, их новизна:**

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 на основе этих данных 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, позволяющей учитывать 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 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 подобия, а также методы математического моделирования с использованием пакетов компьютерных программ *LabVIEW*, *RastrWin3* и *Microsoft Excel*.

**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 7 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%.

**Структура диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 118 наименований, изложена на 167 страницах машинописного текста и включает 51 рисунок, 34 таблицы и 6 приложений.

**Во введении** представлено обоснование актуальности данной работы, поставлена цель и сформулированы научные задачи. Определены объект и предмет исследования, выделены научная новизна и основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** на основе анализа состава ЭТК НГДП с объектами РГ 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 объектов РГ и подсистема объектов добычи нефти и газа – вместе они образуют децентрализованную систему. Объекты механизированной добычи поставляют нефтегазовую смесь в систему сбора и сепарации, затем отсепарированный ПНГ попадает в систему газоснабжения объектов РГ, объекты РГ перерабатывают топливо в электроэнергию, электроэнергия поступает в систему электроснабжения (СЭС) месторождения и распределяется для потребления всеми элементами ЭТК. На рисунке 1 изображена 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 установка, КТП – комплектная трансформаторная подстанция, ЛЭП – линия электропередачи, ПС – подстанция.

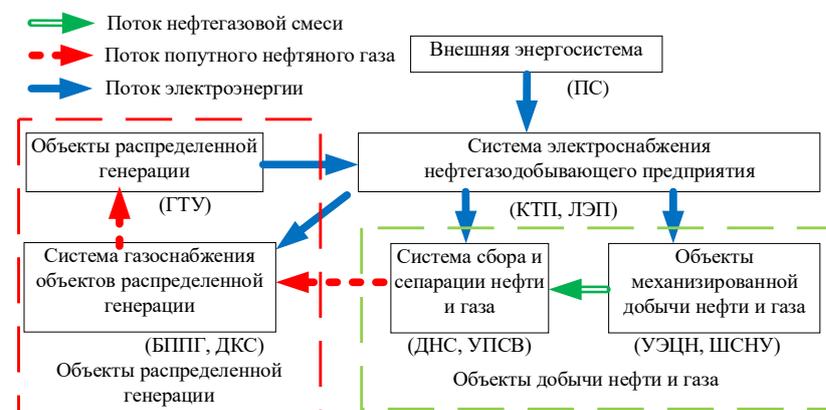


Рисунок 1 – Структурная схема ЭТК НГДП с объектами РГ

Известны мультиагентные модели ЭТК НГДП с объектами РГ, однако они не учитывают взаимодействие подсистемы объектов РГ с подсистемой объектов добычи нефти и газа. В мультиагентной модели каждому объекту ЭТК НГДП с объектами РГ соответствует агент мультиагентной модели. Под агентами подразумеваются автономная программа, взаимодействующая с другими программами-агентами для достижения общей цели. Мультиагентная модель нового типа позволит учесть процесс взаимодействия множества агентов генерации и множества агентов потребления при помощи следующих наблюдаемых параметров:

- дебит жидкости (нефтегазовой смеси),  $H$ , м<sup>3</sup>/ч;
- расход топлива (сепарированного попутного нефтяного газа),  $G$ , м<sup>3</sup>/ч;
- электрическая мощность (комплексная величина),  $\dot{S}$ , кВА.

Структура разработанной мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ представлена на рисунке 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. Правила среды взаимодействия в такой мультиагентной модели подразумевает выполнение баланса мощности и баланса топлива:

$$\begin{cases} \sum \dot{S}^G = \sum \dot{S}^H, \\ \sum G = \sum f(H), \end{cases} \quad (1)$$

где  $\dot{S}^G$  – мощность, выдаваемая объектами генерации в электрическую сеть, кВА,  $\dot{S}^H$  – мощность, потребляемая нагрузкой, кВА,  $G$  – расход топлива для генерации мощности  $\dot{S}^G$ , м<sup>3</sup>/ч,  $H$  – дебит жидкости, обеспечивающийся объектами механизированной добычи, м<sup>3</sup>/ч,  $f(H)$  – функция, отражающая процесс преобразования параметра дебит жидкости в параметр расход топлива, процесс сепарации ПНГ из нефтегазовой смеси, м<sup>3</sup>/ч.

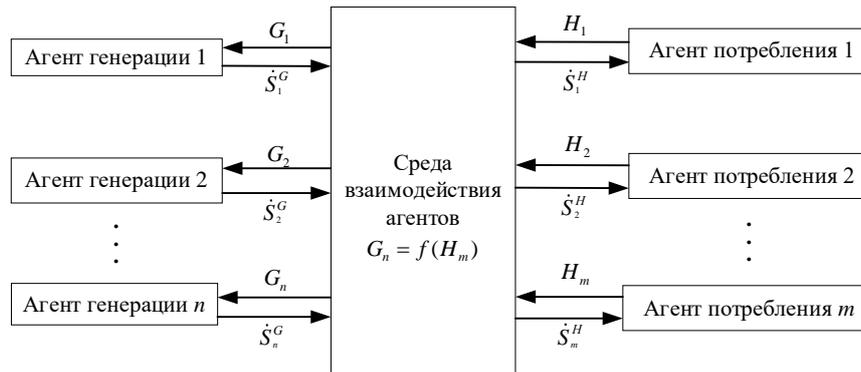


Рисунок 2 – Структура разработанной мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ

Во второй главе разработаны функции взаимодействия агентов мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ, учитывающие зависимости баланса мощности и баланса топлива, то есть зависимость процесса генерации, от параметров технологического процесса добычи нефти и газа. При разработке данных функций учитывались характеристические признаки, представленные в таблице 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 СЭС месторождения и объекты системы сбора нефти и газа.

Таблица 1 – Характеристические признаки множеств агентов мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ

Множество	Характеристические признаки множеств агентов, связанные с балансом мощности		Характеристические признаки множеств агентов, 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, м <sup>3</sup> /ч
$G$	Выдача мощности в электрическую сеть	Генерируемая мощность, $\dot{S}^G$ , кВА.	Преобразование топлива в электроэнергию	Расход топлива, $G$ , м <sup>3</sup> /ч
$H$	Электропотребление	Потребляемая мощность, $\dot{S}^H$ , кВА.	Добыча нефтегазовой смеси	Дебит жидкости, $H$ , м <sup>3</sup> /ч

На рисунке 3 изображена структурная схема взаимодействия агентов в мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ. Агенты множества  $R$  формализуют структурные и параметрические изменения в топологии СЭС месторождения для управляющих воздействий (УВ) по обеспечению баланса мощности. Агенты множества  $G$  формализуют выдачу мощности объектами РГ, также во множество входит агент ПС, отвечающий за минимум электрической мощности, подаваемой из внешней энергосистемы, необходимый для функционирования объектов технологического процесса. При избытке генерации в сети может использоваться дополнительная нагрузка, не относящаяся к ЭТК НГДП (описывается агентами множества  $H$ , представленными бытовой нагрузкой ближайших населенных пунктов, муниципальных учреждений, дачными и гаражными кооперативами и т.п.).

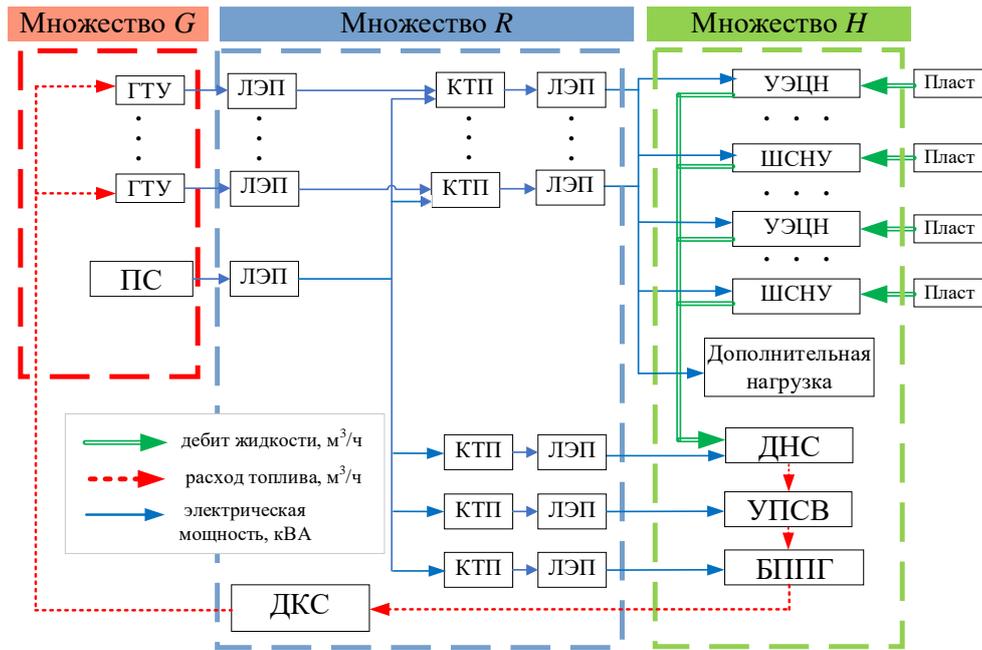


Рисунок 3 – Структурная схема взаимодействия агентов в мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ

В таблице 2 представлены функции агентов мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ. Функция предполагает обработку в реальном времени наблюдаемых параметров, то есть работу с потоками данных.

Таблица 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 <sup>3</sup> /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; $\dot{S}_i^{in}$ – 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 <sup>3</sup> /ч; $\sum H_m$ – суммарный дебит жидкости, м <sup>3</sup> /ч;	$\dot{S}_i^{ex} = \dot{S}_i^{in} - \dot{S}_i^R$ $G^R = f_R(\sum H_m) - \sum G_n - G_0$ где $G_0$ – поток газа, незадействованный в генерации электроэнергии, м <sup>3</sup> /ч; $f_R(\sum H_m)$ – функция, отражающая процесс сепарации ПНГ, м <sup>3</sup> /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 <sup>3</sup> /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

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

Агенты генерации делятся на два типа: агент ПС и агенты ГТУ:

$$\sum \dot{S}_{n+1}^G = \dot{S}_0^G + \sum \dot{S}_n^{G2}. \quad (2)$$

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

$$\dot{S}^{G1} = f_n(G_n) + \dot{S}_0^G, \text{ при } f_n(G_n) = 0, \quad (3)$$

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

Функция агента генерации, соответствующего ГТУ, записывается как:

$$\dot{S}_n^{G2} = f_n(G_n) + \dot{S}_0^G, \text{ при } \dot{S}_0^G = 0, \quad (4)$$

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:

$$\sum \dot{S}_m^H = \sum \dot{S}_b^{H1} + \sum \dot{S}_t^{H2} + \sum \dot{S}_d^{H3}, \quad (5)$$

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, его функция записывается как:

$$\begin{cases} \dot{S}_b^{H1} = f_m(H_m) + \dot{S}_0^H \\ G_m = f_R(\sum H_m) \end{cases}, \text{ при } f_R(\sum H_m) = 0. \quad (6)$$

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.

$$\dot{S}_b^{H1} = P_b^{H1} + \dot{S}_0^{H1} = \frac{\rho_{ж} \cdot g \cdot \left( \frac{P_{буф}}{\rho_{ж} \cdot g} + H_{эцн} \right) \cdot Q_{эцн}}{\eta \cdot K_{\eta} \cdot 86400} + \dot{S}_0^{H1}, \quad (7)$$

где  $P_b^{H1}$  – активная мощность потребляемая УЭЦН, кВт;  $\dot{S}_0^{H1}$  – полная мощность, не затрачиваемая непосредственно на добычу нефтегазовой смеси, кВА,  $\rho_{ж}$  – плотность поднимаемой жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, принимается равным 9,81 м<sup>2</sup>/сек;  $P_{буф}$  – буферное давление, Па;  $H_{эцн}$  – динамический уровень жидкости в скважине, м;  $Q_{эцн}$  – заданный дебит насоса, м<sup>3</sup>/сут;  $\eta$  – КПД насоса в заданной рабочей точке, о.е.;  $K_{\eta}$  – коэффициент учета изменения 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 как:

$$\begin{cases} \dot{S}_t^{H2} = f_m(H_m) + \dot{S}_0^H \\ G_m = f_R(\sum H_m) \end{cases}, \text{ при } f_m(H_m) = 0, \quad (8)$$

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

$$G_m = J \cdot H_m \quad (9)$$

где  $J$  – газовый фактор, количество растворённого в нефти газа, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

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:

$$\begin{cases} \dot{S}_d^{H3} = f_m(H_m) + \dot{S}_0^H \\ G_m = f_R(\sum H_m) \end{cases}, \text{ при } f_m(H_m) = 0, f_R(\sum H_m) = 0, \quad (10)$$

Агенты множества  $R$  делятся на два типа: агенты СЭС месторождения и агенты технологического процесса, отвечающие за баланс топлива. Агенты СЭС месторождения используют потоки данных о входной  $\dot{S}_i^{ex}$  и выходной  $\dot{S}_i^{вых}$  мощности:

$$\dot{S}_i^{вых} = \dot{S}_i^{ex} - \dot{S}_i^R. \quad (11)$$

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

$$G^R = f_R(\sum H_m) - \sum G_n - G_0. \quad (12)$$

**В третьей главе** разработана методика обеспечения баланса мощности, позволяющая учитывать возможные управляющие воздействия, предусмотренные в мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ.

Уравнение баланса мощности в электрической сети НГДП:

$$\sum \dot{S}^G = \sum \dot{S}^H + \sum \dot{S}^R, \quad (13)$$

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 СЭС месторождения (потери, собственные нужды и прочее), кВА.

Оценить баланс мощности можно по величине небаланса мощности:

$$\Delta \dot{S} = \sum \dot{S}^G - \sum \dot{S}^H - \sum \dot{S}^R. \quad (14)$$

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

$$(\dot{S}^{G1} + \sum \dot{S}_n^{G2}) = (\sum \dot{S}_b^{H1} + \sum \dot{S}_t^{H2} + \sum \dot{S}_d^{H3} + \sum \dot{S}_i^R), \quad (15)$$

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 обеспечение 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  $i$ -ым агентом СЭС, кВА.

Учитывая уравнение баланса топлива (12) при использовании ПНГ для генерации электроэнергии, уравнение среды взаимодействия агентов можно записать как:

$$\dot{S}^{G1} = \sum \dot{S}_b^{H1} - \sum \dot{S}_b^{G2} + \sum \dot{S}_t^{H2} + \sum \dot{S}_d^{H3} + \sum \dot{S}_i^R, \quad (16)$$

где  $\dot{S}_b^{G2}$  – мощность, генерируемая за счет использования ПНГ, добываемом  $b$ -ым агентом добычи, кВА. Учитывая топологию электрической сети НГДП с объектами РГ, к уравнению среды взаимодействия агентов добавляются следующие ограничения на активную мощность:

$$\begin{cases} \sum P_b^{G2} - \sum P_b^{H1} - \sum P_d^{H3} - \sum P_i^R \geq 0, \\ P^{G1} - \sum P_t^{H2} \geq 0. \end{cases} \quad (17)$$

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, собственных нужд СЭС месторождения и дополнительной нагрузки допускается от объектов РГ. Задача обеспечения баланса мощности сводится к задаче поиска минимума функции:

$$\begin{cases} \dot{S}^{G1} + \sum \dot{S}_b^{G2} - \sum \dot{S}_b^{H1} - \sum \dot{S}_t^{H2} - \sum \dot{S}_d^{H3} - \sum \dot{S}_i^R \rightarrow \min, \\ \text{где } \dot{S} = \sqrt{P^2 + jQ^2}, \\ \sum P_b^{G2} - \sum P_b^{H1} - \sum P_d^{H3} - \sum P_i^R \geq 0, \\ P^{G1} - \sum P_t^{H2} \geq 0, \\ P_{max}^{G1} \geq \sum P^{G1} \geq P_{min}^{G1}, \\ P_{max}^{G2} \geq \sum P_n^{G2} \geq P_{min}^{G2}, \\ P_{max}^{H1} \geq \sum P_b^{H1} \geq P_{min}^{H1}, \\ P_{max}^{H2} \geq \sum P_t^{H2} \geq P_{min}^{H2}, \\ P_{max}^{H3} \geq \sum P_d^{H3} \geq P_{min}^{H3}, \\ P_{max}^R \geq \sum P_i^R \geq P_{min}^R, \end{cases} \quad (18)$$

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;

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

Значения мощности агентов составляют множество  $E_z$ , определяющее электрический режим на пространстве  $E$  всех возможных режимов:

$$E_z = \{ \dot{S}^{G1}, \dot{S}_n^{G2}, \dot{S}_b^{H1}, \dot{S}_t^{H2}, \dot{S}_d^{H3}, \dot{S}_i^R \}, \quad (19)$$

где  $z$  – номер электрического режима.

Задача в данной постановке является задачей нелинейного программирования с ограничением в виде неравенства. Для решения таких задач оптимизации используется метод решения, относящийся к группе непрямых методов, – 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 функции, при выполнении для каждой условий:

$$A(\dot{S}) = 0 \quad \forall \dot{S} \in E_z, \quad (20)$$

$$A(\dot{S}) \neq 0 \quad \forall \dot{S} \notin E_z. \quad (21)$$

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

$$F(\dot{S}, k) = \dot{S} + k \cdot A(\dot{S}), \quad (22)$$

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

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 баланса мощности используется отклонение напряжения  $\delta U$  (% от номинального) и отклонение частоты  $\Delta f$  (Гц):

$$\Delta \dot{S} = \begin{cases} \delta U, & \text{где } \delta U_{\max} = 10\%, \\ \Delta f, & \text{где } \Delta f_{\max} = 0,4 \text{ Гц.} \end{cases} \quad (23)$$

Для учета структурных изменений в топологии электрической сети НГДП с объектами РГ находятся все возможные множества  $E_z$  в пространстве  $E$  и все возможные сценарии  $k$  перехода между ними. Агенты множества  $R$ , следуя сценариям  $k$ , при помощи интеллектуальных ключей обеспечивают включение и отключение агентов генерации и потребителей в электрической сети.

Блок-схема алгоритма обеспечения баланса мощности с учетом возможных УВ, предусмотренных в мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ, представлена на рисунке 4.

**В четвертой главе** на основании представленных в предыдущих главах структуры, функций взаимодействия агентов и методики обеспечения баланса мощности разработана цифровая мультиагентная модель ЭТК НГДП с объектами РГ в среде графического программирования *LabVIEW* с применением объектно-ориентированного подхода. Сформированы классы объектов, описаны их свойства и реализуемые ими функции. Методика обеспечения баланса мощности была апробирована при расчете СЭС Южного купола Юрчукского месторождения (Пермский край). Фрагмент пользовательского интерфейса, разработанной цифровой мультиагентной модели ЭТК месторождения, представлен на рисунке 5. Структурная схема цифровой мультиагентной модели ЭТК Южного купола Юрчукского месторождения изображена на рисунке 6.

Разработанное приложение показывает потоки мощности на всех участках электрической сети, учитывая разделение нагрузки на два фидера (с расчетом баланса мощности при текущем электрическом режиме). Также интерфейс отображает показатели добычи ПНГ, его расход на генерацию мощности (с расчетом баланса топлива при текущем электрическом режиме ЭТК НГДП с объектами РГ).

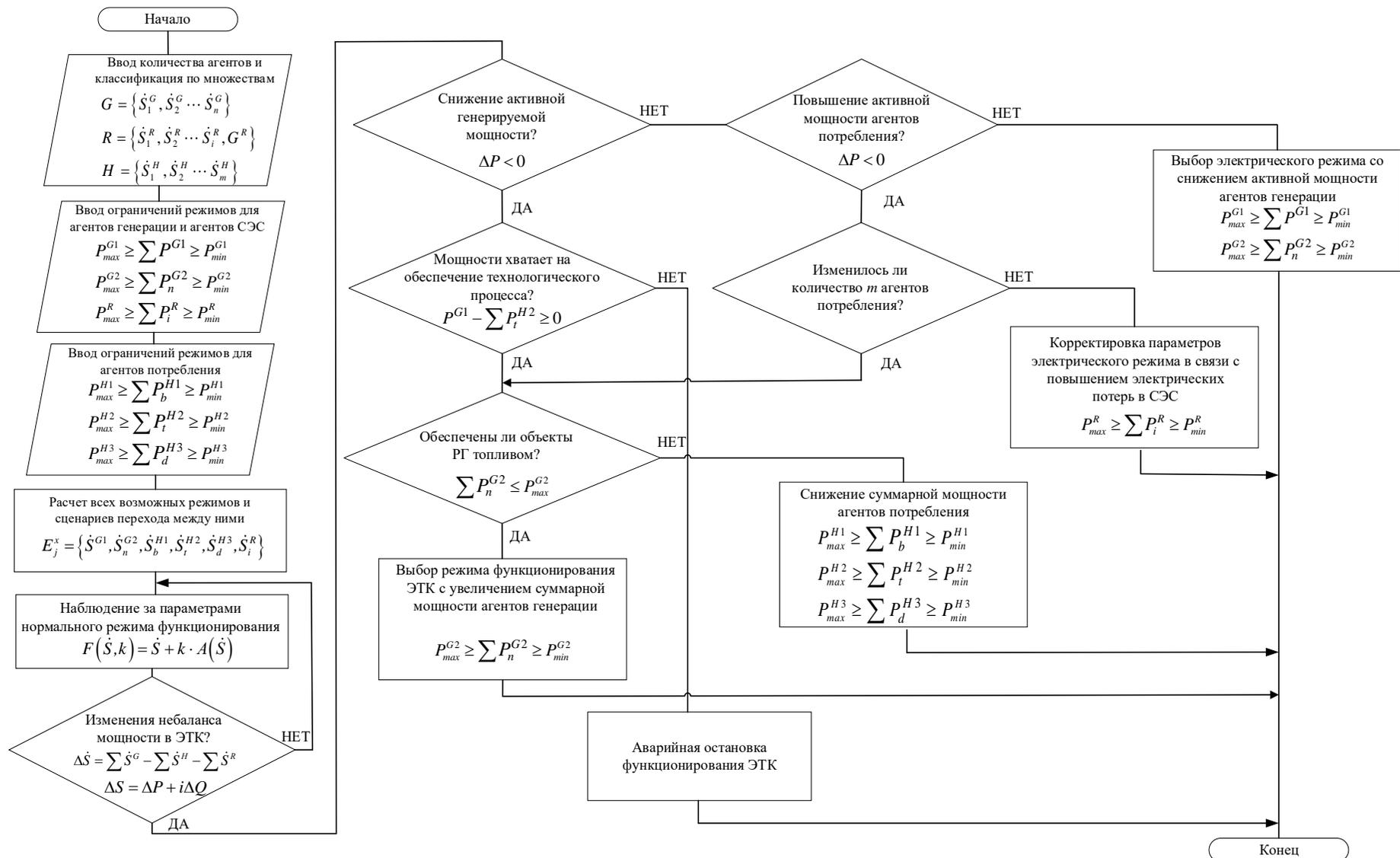


Рисунок 4 – Блок-схема алгоритма обеспечения баланса мощности с учетом возможных управляющих воздействий, предусмотренных в мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ

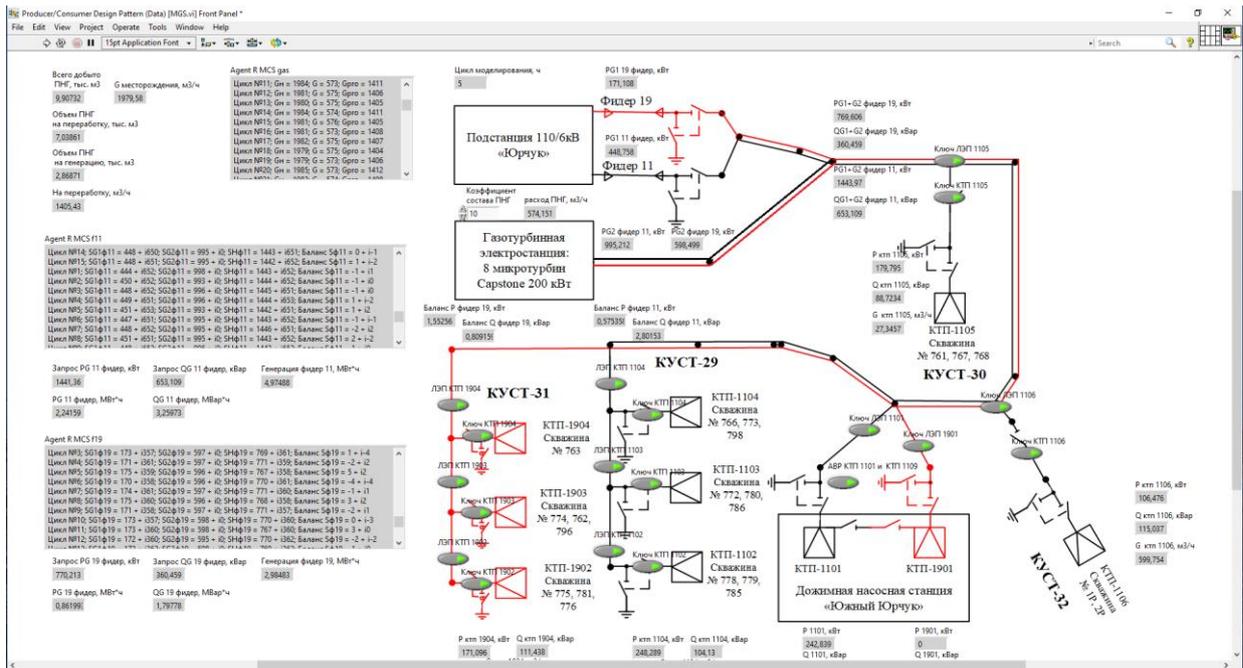


Рисунок 5 – Пользовательский интерфейс разработанной цифровой мультиагентной модели ЭТК Южного купола Юрчукского месторождения

Условные обозначения:

→ Данные о мощности фидера 11    → Данные о мощности фидера 19    → Данные о дебите

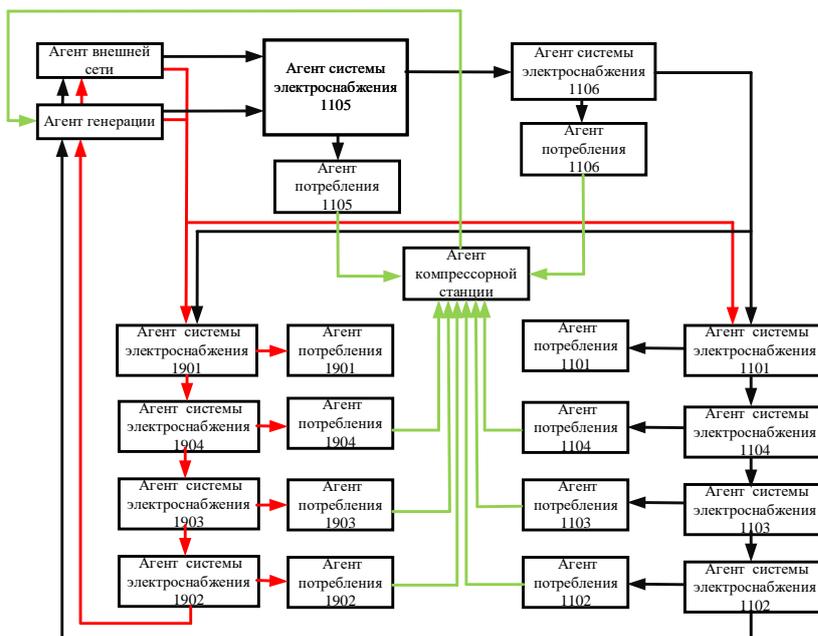


Рисунок 6 – Структурная схема цифровой мультиагентной модели ЭТК Южного купола Юрчукского месторождения

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. Это означает, что задается упрощенная динамика среды – в зависимости от решаемой задачи динамика среды может быть описана как через доступные измерения режимных параметров от интеллектуальных счетчиков электроэнергии, так и посредством соответствующих технологических регламентов режима функционирования ЭТК.

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.

На лабораторном стенде выполнена оценка погрешности разработанной методики обеспечения баланса мощности в электрической сети НГДП. В качестве оборудования выбрана лабораторная база кафедры «Микропроцессорные средства автоматизации» ФГАОУ ВО ПНИПУ. В качестве агентов генерации использовалась система на одном валу «Асинхронный электродвигатель – Синхронный генератор», мощностью 1,5 кВт. В качестве агентов потребления использовалась нагрузка: двигательная (машины переменного тока 120 Вт и 220 Вт / 380 В / 1500 об/мин) и активная (блок сопротивлений 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.

Выполнена оценка соответствия разработанных цифровой и физической моделей. Принято допущение, что характер изменения рабочих характеристик (коэффициент загрузки, коэффициент мощности, КПД) реальной двигательной нагрузки и лабораторных двигателей одинаковый. Также принято допущение, что характер изменения рабочих характеристик (ток возбуждения, КПД) реального генератора ГТУ и лабораторного – одинаковый. В таком случае, коэффициенты пропорциональности  $\pi$  между ними будут следующие (индекс «Р» соответствует реальному двигателю, индекс «Л» – лабораторному):

$$\pi_3 = \frac{K_{3P}}{K_{3L}} = 1; \quad \pi_{\cos\varphi} = \frac{\cos\varphi_P}{\cos\varphi_L} = 1; \quad \pi_\eta = \frac{\eta_P}{\eta_L} = 1; \quad \pi_B = \frac{I_{BP}}{I_{BL}} = 1 \quad \pi_P = \frac{P_P}{P_L} = \text{var} \quad (24)$$

Внешний вид лабораторного стенда и структурная схема мультиагентной модели изображены на рисунке 7.

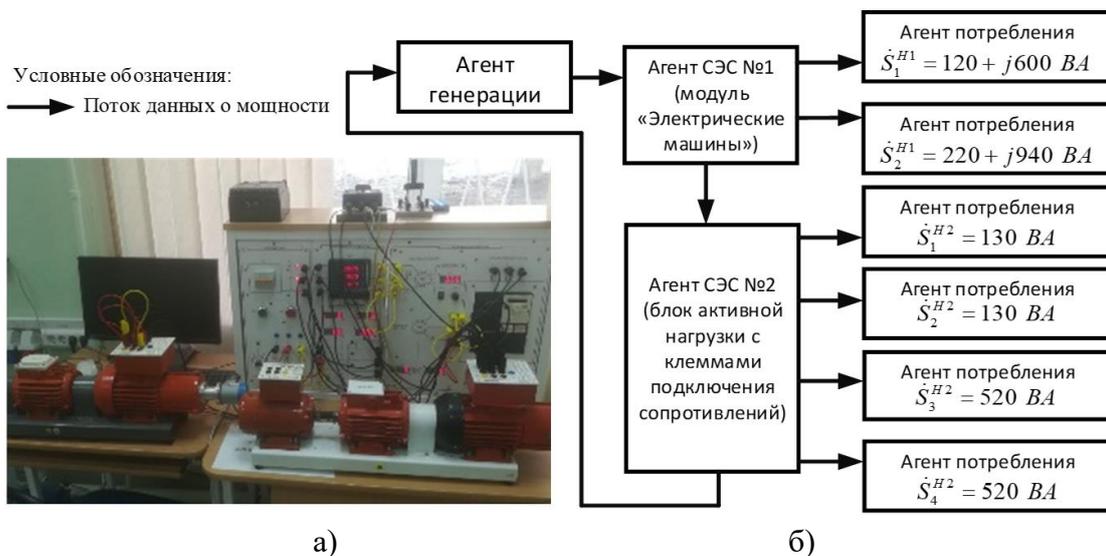


Рисунок 7 – а) внешний вид лабораторного стенда, б) структурная схема мультиагентной модели

Эксперимент проводился для определения мощности агентов потребления в разных режимах работы ЭТК и сценариях перехода между ними. Сначала моделировались установившиеся электрические режимы, а затем сценарии подключения и отключения нагрузки с последующим изменением выдаваемой в сеть мощности агентом генерации.

Результаты эксперимента состоят из  $N=8$  измерений. При обработке данных эксперимента принят уровень доверительной вероятности  $\alpha=0,95$ . Погрешность измерений измерителя мощности составляет  $\theta=\pm 0,3\%$ . Сравнение установившихся электрических режимов, рассчитанных при помощи мультиагентной модели, с режимами сети, полученными на лабораторном стенде, представлено в таблице 3. Номер режима состоит из 2 частей, разделенных точкой – первое число означает номер подключенного агента потребления из множества двигательной нагрузки ( $H1$ ), второе – количество подключенных агентов из множества активной нагрузки по порядку ( $H2$ ).

Таблица 3 – Сравнение результатов моделирования режимов, полученных на лабораторном стенде и рассчитанных в мультиагентной модели

Режим	Физическая модель, $\dot{S}^H$ , ВА	Мультиагентная модель, $\dot{S}^H$ , ВА	Погрешность, $\varepsilon_p$ , %	Погрешность, $\varepsilon_{jQ}$ , %
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, не превышает 5%. Учтенные ограничения: напряжение в сети в диапазоне 361 – 399 В, параметры агента генерации не должны превышать паспортные значения оборудования: ток возбуждения синхронного генератора – 2 А, ток статора асинхронного двигателя – 8 А.

Сравнение параметров сценариев перехода, рассчитанных при помощи мультиагентной модели с параметрами сценариев перехода, полученных на лабораторном стенде, представлено в таблице 4.

Таблица 4 – Сравнение результатов моделирования сценариев перехода, полученных на лабораторном стенде и рассчитанных в мультиагентной модели

Сценарий	Исходный режим	Конечный режим	Физическая модель, $\dot{S}^H$ , ВА	Мультиагентная модель, $\dot{S}^H$ , ВА	Погрешность, $\varepsilon_p$ , %	Погрешность, $\varepsilon_{jQ}$ , %
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 не превышает 5,54%. Предложенная методика обеспечения баланса мощности вместе с предложенным подходом к построению мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ позволяет поддерживать баланс мощности в электрической сети даже при недостатке измерений, а также в условиях ограничений по составу и дискретности измерений.

На лабораторном стенде выполнена оценка погрешности предложенного способа моделирования управляющего воздействия в мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ. 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 физической модели ЭТК НГДП с объектами РГ синхронный генератор соответствует агенту генерации, который может работать параллельно с сетью, а машина переменного тока соответствует микрогазотурбинной установке. Идея эксперимента заключается в том, чтобы перевести источник питания двигателя постоянного тока и возбудитель синхронной машины в автоматический режим управления, осуществить подключение синхронного генератора к сети, соединить с платой сбора информации *National Instruments USB-6009*, а затем, используя методику по обеспечению баланса мощности, провести моделирование управляющих воздействий для поддержания необходимого коэффициента мощности.

Рисунок 8 иллюстрирует взаимодействие лабораторного стенда и цифровой мультиагентной модели ЭТК для моделирования управляющих воздействий.

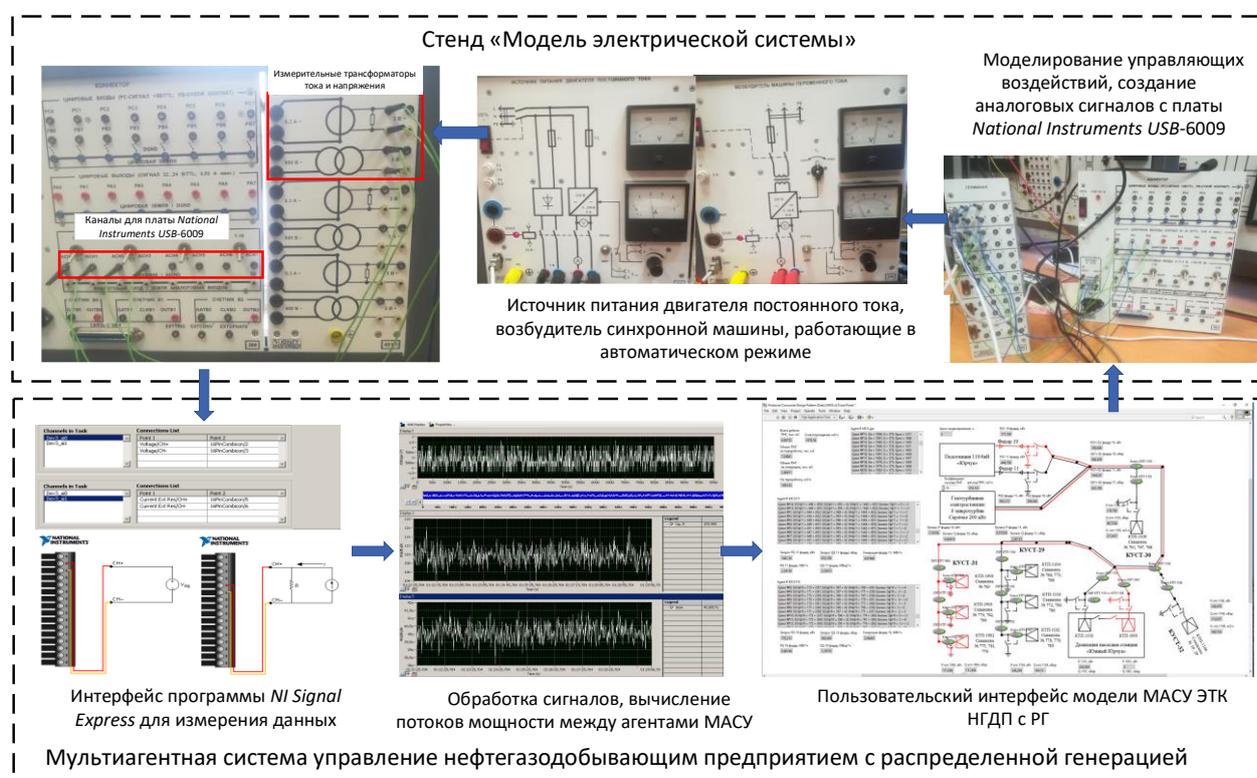


Рисунок 8 – Иллюстрация взаимодействия лабораторного стенда и цифровой мультиагентной модели ЭТК НГДП с объектами РГ

Анализ результатов эксперимента в ручном и автоматическом режимах модулей стенда «Модель электрической системы» при отработке сценария 1 представлен в таблице 5. 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 (относительная погрешность определяется максимальной погрешностью блока измерительных трансформаторов тока и напряжения БИТ-3. Согласно паспортным данным, погрешность измерений приборов составляет не более 2,5%).

В автоматическом режиме снижение мощности агента потребления прошло более плавно за счет создания аналогового сигнала управления с платы *National Instruments USB-6009*. Отклонение напряжения в сети от допустимого не превысило 3,7%.

Таблица 5 – Анализ результатов эксперимента в ручном и автоматическом режимах модулей стенда «Модель электрической системы» при отработке сценария 1

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, $U_{руч}$ , 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
Автоматический	Напряжение в сети, $U_{авт}$ , 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

На лабораторной установке кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ФГАОУ ВО ПНИПУ выполнена оценка погрешности расчета электрической мощности, исходя из теплопроизводительности ПНГ, при обеспечении баланса мощности в электрической сети НГДП. Внешний вид лабораторной установки с использованием компонентов газотурбинного двигателя 9И56 мощностью 80 кВт производства ПАО «Калужский двигатель» представлен на рисунке 9. ПНГ был взят из Ильичевского месторождения.



Рисунок 9 – Внешний вид лабораторной установки ГТД 9И56

В качестве измерительного оборудования использовался газоанализатор *Optima-7*; при диапазоне измерений от +473 до 923 °К относительная погрешность составляет 1%. Для замера расходов топлива и расхода воздуха использовались ротаметры с относительной погрешностью 0,5%. Был произведен перерасчет расхода топлива и расхода воздуха для генерации 80 кВт электрической мощности (номинальных параметров ГТУ). Сравнение результатов расчета температуры и мощности с результатами замеров представлено в таблице 6.

Таблица 6 – Сравнение результатов расчета и результатов экспериментальных замеров параметров ГТУ

Параметр	Результаты расчета	Результаты эксперимента	Погрешность, %
Массовый расход топлива $G_T^M$ , кг/с	0,0003	0,0003	-
Массовый расход воздуха $G_B^M$ , кг/с	0,0055	0,0055	-
Коэффициент избытка воздуха $\alpha$ , о.е.	1,27	1,27	-
Температура на входе в турбину $T_{вхСТ}$ , °К	725,80	737,00	1,51
Вырабатываемая мощность $P^G$ , Вт	738,69	730,30	1,73
Объемный расход топлива при номинальной мощности ГТУ (80 кВт) $G_T^V$ , м3/ч	112,90	111,62	1,74
Объемный расход воздуха при номинальной мощности ГТУ (80 кВт) $G_B^V$ , м3/ч	1698,17	1717,69	1,74

Погрешность расчетов не превышает 1,74%. Результаты расчета расхода топлива и расхода воздуха при работе объектов генерации в номинальном режиме с использованием различного по составу ПНГ представлены в таблице 7 (НГСП – нефтегазосборный пункт, ГТЭС – газотурбинная электростанция, ПКС – промежуточная компрессорная станция).

Таблица 7 – Расходы топлива и воздуха в разных режимах работы ГТУ

Объект (Источник ПНГ)	Теплопроизводительность ПНГ, кДж/кг	Расход воздуха, м <sup>3</sup> /ч	Расход топлива, м <sup>3</sup> /ч	Удельный расход топлива, $\frac{\text{м}^3}{\text{кВт}\cdot\text{ч}}$
НГСП-1035 Ильичевка	40564,433	1701,85	127,58	1,60
ГТЭС Чашкино	43556,194	1701,70	121,97	1,52
ПКС Куета	29285,120	1717,19	182,38	2,28
ПКС Курбаты	39693,953	1714,41	127,92	1,60
ПКС Кокуй	39359,681	1723,15	110,60	1,38

Разработанная цифровая мультиагентная модель ЭТК НГДП с объектами РГ обеспечивает баланс мощности в электрической сети НГДП, учитывая теплопроизводительность ПНГ различных месторождений в сценариях электрических режимов ЭТК НГДП при работе генерирующих установок малой и средней мощности.

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. м<sup>3</sup> в год, при общем объеме добычи 492 млн. м<sup>3</sup> 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.

### 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 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 электрических режимов ЭТК НГДП;

4) разработана и верифицирована цифровая мультиагентная модель электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия с объектами распределенной генерации малой и средней мощности.

### **Основные работы, опубликованные по теме диссертации**

1. Ensuring Reliability in the Operational Management of the Power Supply System Modes of the Mineral Industries Enterprises / N.V. Pavlov, A.V. Romodin, A.B. Petrochenkov // Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus): [Proc. Conf.], Jan. 27-30, 2020, St. Petersburg, Moscow, Russia / IEEE Russia North-West section, IEEE Russia section, St. Petersburg Electrotechn. Univ. LETI, National Research Univ. of Electronic Technology MIET, Glyndwr Univ. - [S. l.] : IEEE, 2020. - P. 1287-1290., Scopus;

2. Multi-agent Approach to Modeling of Electrotechnical Complexes Elements at the Oil and Gas Production Enterprises / N. V. Pavlov, A. B. Petrochenkov // 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus) [Electronic resource]: [Proc. Conf.], Jan. 26-28, 2021, St. Petersburg, Moscow, Russia / IEEE Russia North-West section, IEEE Russia section, St. Petersburg Electrotechn. Univ. LETI, National Research Univ. of Electronic Technology MIET, Glyndwr Univ. - [S. l.] : IEEE, 2021. - P. 1504-1508. - URL: <https://iee-explore.ieee.org/document/9396506> (дата обращения: 25.05.2021). - DOI 10.1109/ElConRus51938.2021.9396506., Web of Science;

3. Мультиагентный подход к моделированию систем электроснабжения с распределенной генерацией / Н. В. Павлов, А. Б. Петроченков, А. В. Ромодин // Электротехника. - 2021. - № 11. - С. 2-8., ВАК; A Multiagent Approach for Modeling Power-Supply Systems with MicroGrid / N. V. Pavlov, A. B. Petrochenkov, A. V. Romodin // Russian Electrical Engineering. - 2021. - Vol. 92, № 11. - P. 637-643., Scopus;

4. Development of methods for modeling of oil and gas producing enterprises electrotechnical complexes / A. V. Romodin, D. Y. Leyzgold, S. V. Mishurinskikh, N. V. Pavlov, A. S. Semenov // Journal of Physics: Conference Series. - 2021. - Vol. 1886. - Art. 012003. 7 p., DOI: 10.1088/1742-6596/1886/1/012003 Scopus;

5. Разработка мультиагентной системы управления электрическими режимами электротехнического комплекса нефтегазодобывающего предприятия с распределенной генерацией / Н.В. Павлов, А.Б. Петроченков // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. - 2022. - № 42., ВАК.

6. Разработка алгоритма обучения мультиагентной системы управления электротехническим комплексом нефтегазодобывающего предприятия с распределенной генерацией / Н. В. Павлов, А. Б. Петроченков // Электротехника. - 2022. - № 11., ВАК.; Developing a Learning Algorithm for a Multiagent Control System of an Electrical-Engineering Facility for an Oil- and Gas-Production Enterprise with Distributed Generation / N. V. Pavlov, A. B. Petrochenkov, // Russian Electrical Engineering. - 2022. - Vol. 93, № 11. - P. 690-696., Scopus;

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023662754. Мультиагентная система управления электротехническим комплексом нефтегазодобывающего предприятия с распределенной генерацией / Павлов Н. В., Петроченков А.Б.