

На правах рукописи



Нестеренко Глеб Борисович

**РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ И АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ
НАКОПИТЕЛЯМИ ЭНЕРГИИ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ В
АВТОНОМНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМАХ**

Специальность 2.4.3 — Электроэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Зырянов Вячеслав Михайлович**,
кандидат технических наук, старший научный сотрудник

Официальные оппоненты: **Суслов Константин Витальевич**,
доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (г. Москва), кафедра гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии, профессор;

Смоленцев Николай Иванович,
кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики» (г. Новосибирск), кафедра систем автоматизированного проектирования, доцент.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань.

Защита диссертации состоится «05» октября 2023 года в 13:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.347.05 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте организации www.nstu.ru

Автореферат разослан «__» июля 2023 г.

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

Анатолий Анатольевич Осинцев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В Российской Федерации эксплуатируются тысячи изолированных систем электроснабжения с автономными генераторными установками (автономных энергосистем), обеспечивающих электроэнергией населённые пункты и промышленные предприятия топливно-энергетического и минерально-сырьевого комплекса, расположенные, в основном, в удалённых районах Сибири и Дальнего Востока. Такие районы характеризуются не только удалённостью от ЕЭС России, но и дорогостоящей логистикой при снабжении материалами, оборудованием, топливом. Доставка топлива производится в основном в рамках Северного завоза по «зимникам», функционирующим короткий отрезок времени зимой, или по рекам в ещё более короткий период весеннего половодья. В таких условиях себестоимость электроэнергии достигает 20–237 руб./кВт·ч, что в 5–55 раз выше средней по России. Преобладающую долю в себестоимости имеет топливная составляющая.

Одна из характерных особенностей автономных энергосистем нефтегазодобывающих и других промышленных предприятий – соизмеримость номинальных мощностей электростанций (как правило, от нескольких сотен кВт до 25 МВт) и наиболее крупных электроприёмников. Их коммутации или изменения режима работы даже при выполнении нормальных технологических операций приводят к значительным, резким изменениям режимных параметров. При частой повторяемости операций такую нагрузку принято относить к резкопеременной. Резкие сбросы и набросы нагрузки более 20–30 % от номинальной мощности электростанции приводят к ударным изменениям частоты (происходящим с большой скоростью), опасным для генераторных агрегатов и двигательной нагрузки, сокращающим моторесурс основного технологического оборудования.

Основу современной автономной энергетики составляют дизель-генераторные установки (ДГУ). При всех достоинствах основным недостатком ДГУ является дороговизна топлива, причём при резкопеременной нагрузке, характерной для систем электроснабжения промышленных объектов, потребление топлива дополнительно возрастает.

Автономные электростанции нефте- и газодобывающих предприятий в последние десятилетия активно оснащаются газопоршневыми (ГПУ) и газотурбинными (ГТУ) установками, работающими на попутном или природном газе, добываемом на месте. Однако из-за инерционности топливного тракта для ГПУ задача поддержания частоты при работе на резкопеременную нагрузку оказывается более сложной, чем для ДГУ. Кроме того, при отклонениях частоты более чем на 1,0–1,5 Гц в течение 0,2 с происходит отключение ГПУ их технологическими защитами. Во избежание этого и для поддержания требуемого уровня частоты распространена практика завышения установленной мощности

электростанции за счёт дополнительных агрегатов, что приводит к увеличению капитальных затрат и снижению коэффициента использования установленной мощности. Альтернатива такому подходу – установка на электростанциях систем накопления электрической энергии (СНЭЭ) для сглаживания бросков мощности нагрузки, уменьшения амплитуды отклонений частоты и скорости её изменения.

Востребованным решением в настоящее время также являются автономные гибридные энергоустановки (АГЭУ), включающие в свой состав традиционные генераторы, возобновляемые источники энергии (ВИЭ) и СНЭЭ. Стохастический характер генерации ВИЭ осложняет задачу регулирования частоты в условиях резкопеременной нагрузки и ограничивает область применения АГЭУ. Функции СНЭЭ в составе АГЭУ в настоящее время, как правило, сводятся только к согласованию графиков генерации и потребления активной мощности.

Во всех описанных выше случаях, учитывая многофункциональность и быстродействие СНЭЭ, целесообразно использовать их для участия в регулировании частоты, прежде всего, в автономных энергосистемах с резкопеременной нагрузкой. Для этого необходимо разработать систему автоматического регулирования, реализующую алгоритмы управления, адекватные техническим характеристикам СНЭЭ.

Степень разработанности темы исследования. Вклад в развитие научного направления по применению СНЭЭ для управления режимами и переходными процессами энергосистем внесли такие российские учёные и специалисты, как: Астахов Ю.Н., Воробьёв П.Е., Глушкин И.З., Гулия Н.В., Гусев Ю.П., Деньщиков К.К., Дыбко М.А., Жук А.З., Зырянов В.М., Илюшин П.В., Кучак С.В., Лукутин Б.В., Мисбахов Р.Ш., Новиков Н.Л., Смоленцев Н.И., Суслов К.В., Федотов А.И., Харитонов С.А. и др.

Зарубежные разработки по тематике СНЭЭ представлены большим количеством публикаций. Вопросам применения СНЭЭ для ограничения отклонений частоты посвящены работы авторов: Arrigo F., Baltac S.A., Bompard E., Cohn E., Cui X., Jiang Y., Kathpal P.H., Li J., Liang F., Mallada E., Mazza A., Meng Y., Monti A., Musa A., Shelton C.J., Toma L., Wen Y., Xiong R., Yang Q., Zhang K. и др.

За рубежом СНЭЭ применяются для первичного и вторичного регулирования частоты в крупных энергообъединениях, а также для стабилизации частоты в автономных энергосистемах. Анализ Базы данных Министерства энергетики США показывает, что 55 % проектов СНЭЭ по всему миру связано с участием в регулировании частоты. При этом СНЭЭ многофункциональны и во многих случаях выполняют функцию регулирования частоты в качестве дополнительной.

Имеется множество зарубежных работ по применению СНЭЭ для регулирования частоты, но в них не предлагается единого устоявшегося подхода к тому, как организовать этот процесс для получения наибольшего эффекта. Открытыми остаются вопросы учёта уровня заряда (относительная величина,

показывающая отношение запасенной энергии к значению номинальной энергоемкости подсистемы накопления), состояния источников энергии в автономной энергосистеме, выбора параметров настройки регуляторов, координирования участия в регулировании разных источников энергии и другие.

Используемые в автономных энергосистемах РФ системы регулирования частоты не предусматривают участие СНЭЭ, даже если она уже установлена в энергосистеме для повышения коэффициента использования установленной мощности ВИЭ или решения других задач. Современные СНЭЭ обладают высоким быстродействием (время отклика около 5 мс), при этом участие в регулировании частоты не требует большого объёма энергии по сравнению с их основной функцией. Поэтому системы накопления могут выступить тем инструментом, который обеспечит поддержание частоты в условиях резкопеременной нагрузки. В связи с этим актуальным вопросом является создание технологий, позволяющих привлекать СНЭЭ к регулированию частоты в автономных энергосистемах.

Объект исследования – автономная энергосистема, имеющая в своём составе систему накопления электрической энергии.

Предмет исследования – средства и способы управления активной мощностью источников энергии при регулировании частоты в автономной энергосистеме с накопителем энергии.

Цель работы – исследование и разработка способов и алгоритмов управления, позволяющих использовать систему накопления электрической энергии для стабилизации частоты в автономной энергосистеме.

Для достижения цели ставятся и решаются следующие задачи:

1. Анализ результатов мониторинга режимных параметров электростанции в автономной энергосистеме нефтедобывающего предприятия с резкопеременной нагрузкой;
2. Обоснование и формулирование требований к системе автоматического регулирования частоты в автономной энергосистеме со СНЭЭ;
3. Разработка математической модели автономной энергосистемы;
4. Разработка алгоритмов управления СНЭЭ для регулирования частоты;
5. Разработка алгоритма поддержания уровня заряда СНЭЭ;
6. Разработка алгоритмов управления АГЭУ для регулирования частоты;
7. Исследование эффективности алгоритмов управления.

Методология и методы исследования. Для получения данных о режимных параметрах электростанции в автономной энергосистеме проведён пассивный натурный эксперимент. Для разработки, апробации и исследования эффективности алгоритмов управления СНЭЭ и АГЭУ в составе автономной энергосистемы использованы методы математического моделирования в среде MATLAB/Simulink.

В диссертационной работе использовались: теория обработки сигналов, теория мгновенной мощности, теория имитационного моделирования, теория

автоматического управления, теория оптимизации, теория нечёткой логики.

Научная новизна диссертации:

1. Предложен новый способ регулирования частоты в автономной энергосистеме с помощью СНЭЭ, сочетающий управление по возмущающему воздействию и по отклонению частоты, который позволяет практически полностью исключить ударные изменения частоты и уменьшить её отклонения до уровня, установленного для ЕЭС России согласно ГОСТ Р 55890-2013;

2. Разработан алгоритм распределения во времени долей участия в регулировании частоты накопителей энергии разных типов в составе гибридной СНЭЭ за счёт динамического изменения коэффициентов усиления, способствующий экономии ресурса аккумулирующих элементов;

3. Предложен новый способ и разработан алгоритм поддержания уровня заряда накопителя энергии в рабочем диапазоне без прерывания выполнения его основной технологической функции за счет коррекции управляющего воздействия в зависимости от фактического уровня заряда;

4. Впервые предложена концепция исполнения системы автоматического регулирования частоты в энергосистеме с АГЭУ с использованием регулировочных возможностей СНЭЭ и традиционной генерации, с привлечением к регулированию солнечной электростанции за счёт создания резерва мощности на ней и динамического перераспределения долей участия в регулировании в зависимости от уровня заряда накопителя.

Теоретическая и практическая значимость работы

Теоретическая значимость:

1. Разработанные алгоритмы управления являются основой для проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ на темы, связанные с исследованием эффективности их работы в аварийных режимах, влиянием параметров СНЭЭ на качество электрической энергии, разработкой подходов к определению оптимального состава источников энергии в автономной энергосистеме и оптимальных параметров накопителей энергии, в том числе в составе гибридных СНЭЭ, а также с разработкой и исследованием способов управления накопителями энергии в ЕЭС России;

2. Разработанные алгоритмы управления СНЭЭ и АГЭУ обладают потенциалом для дальнейшего развития с точки зрения учёта индивидуальных особенностей различных типов источников энергии и электроприёмников, в частности для разработки систем управления АГЭУ с преобладающей долей солнечной или ветряной генерации, газопоршневой или газотурбинной генерации, со СНЭЭ на основе накопителей электрической энергии разных типов и др.

Практическая значимость и реализация работы:

1. Разработанные алгоритмы управления кардинальным образом уменьшают отклонения частоты в автономных энергосистемах при помощи СНЭЭ

и дают возможность применять ВИЭ и генераторные установки, чувствительные к резким и глубоким броскам мощности, в энергосистемах с резкопеременной нагрузкой без превышения установленной мощности электростанции;

2. Предложенный способ регулирования частоты в автономной энергосистеме, включающей систему накопления электрической энергии, защищён патентом РФ на изобретение RU 2783040;

3. Разработан и зарегистрирован программный продукт для обработки результатов мониторинга режимных параметров энергообъектов (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022667812);

4. Представлены акты внедрения результатов работы в промышленность в компании ООО «РЭНЕРА-Энертек» и в учебный процесс Новосибирского государственного технического университета;

5. Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 20-38-90182) и Фонда содействия инновациям (договор № 15385ГУ/2020).

Положения, выносимые на защиту:

1. Сочетание управления активной мощностью СНЭЭ по возмущению и по отклонению частоты значительно уменьшает ударные изменения частоты и обеспечивает её стабилизацию в автономных энергосистемах в таких же пределах, как и в ЕЭС России согласно ГОСТ Р 55890-2013, даже в условиях резкопеременной нагрузки;

2. Управление активной мощностью накопителей энергии в составе гибридной СНЭЭ с динамическим изменением коэффициентов усиления обеспечивает рациональное распределение и согласование во времени долей участия в регулировании частоты накопителей энергии разных типов, позволяя экономить их ресурс;

3. Поддержание уровня заряда накопителя энергии за счет коррекции управляющего воздействия в зависимости от фактического уровня заряда позволяет поддерживать его в рабочем диапазоне без прерывания выполнения основной технологической функции СНЭЭ;

4. Создание резерва мощности на солнечной электростанции и динамическое перераспределение долей участия в регулировании между СНЭЭ и СЭС позволяет рационально использовать регулировочные возможности всех источников энергии в составе АГЭУ для поддержания частоты.

Диссертация соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 2.4.3 – Электроэнергетика: пункт 16 – «Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике»; пункт 19 – «Разработка методов и устройств контроля, анализа и управления качеством электроэнергии».

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов обеспечена корректно выполненными расчётами в промышленном программно-вычислительном комплексе MATLAB/Simulink с использованием математической модели, точность которой подтверждена сопоставлением результатов вычислительных и натуральных экспериментов. Расчёт на модели в среде MATLAB/Simulink даёт количественное и качественное совпадение с результатами натуральных экспериментов.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета, сессиях Международного Совета по большим электрическим системам высокого напряжения СИГРЭ (г. Париж, 28 августа – 2 сентября 2022 г. и 24 августа – 3 сентября 2020 г.) и международных научных конференциях: «IEEE 7th International Energy Conference» (г. Рига, 9–12 мая 2022 г.), «The 4th International Conference on Clean Energy and Electrical Systems» (г. Токио, 2–4 апреля 2022 г.), «EnergyNet.CON» (г. Москва, 16–20 ноября 2020 г.), «Ural Smart Energy Conference» (г. Екатеринбург, 13–15 ноября 2020 г.), «Электроэнергетика глазами молодёжи» (г. Ставрополь, 14–18 сентября 2020 г. и г. Иркутск, 16–20 сентября 2019 г.), «Энергетика XXI века: Устойчивое развитие и интеллектуальное управление» (г. Иркутск, 7–11 сентября 2020 г.), «Aspire to Science» (г. Новосибирск, 18 апреля 2019 г.), «Progress through Innovations» (г. Новосибирск, 28 марта 2019 г.).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 32 научных работах, в том числе в 5 статьях в изданиях согласно перечню российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, в 11 статьях в изданиях, индексируемых в наукометрических базах данных Scopus и Web of Science, и в 16 статьях в прочих изданиях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 105 наименований, и трёх приложений. Общий объем работы составляет 176 страниц, включает 98 рисунков и 11 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи, описаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов, внедрение и апробация полученных результатов, сформулированы выносимые на защиту положения.

Первая глава посвящена обзору современного состояния проблемы регулирования частоты в электроэнергетических системах.

В настоящее время в ряде энергосистем с большой долей ВИЭ-генерации,

имеющей стохастический характер выработки электроэнергии, наблюдаются проблемы, связанные с регулированием частоты (недопустимые отклонения частоты, аварийные отключения генераторов и потребителей, системные аварии). В России этот вопрос уже сегодня актуален для автономных энергосистем, особенно при наличии резкопеременной нагрузки.

СНЭЭ являются перспективным средством стабилизации частоты. Анализ Базы Минэнерго США говорит о том, что в 55 % проектов СНЭЭ в мире предусмотрено участие в регулировании частоты. Во многих странах мира рынок регулирования частоты стал главным катализатором инвестиций в СНЭЭ. При этом в 86 % проектов СНЭЭ выполняет 2 и более функций управления.

В проектах, реализуемых в России, потенциал СНЭЭ используется не полностью. Это снижает их технико-экономические показатели. В РФ реализован ряд проектов СНЭЭ в автономных энергосистемах, однако во всех этих проектах СНЭЭ не участвуют в регулировании частоты. Для привлечения СНЭЭ к стабилизации частоты в автономных энергосистемах требуется разработка системы автоматического регулирования и алгоритмов управления, адекватных техническим характеристикам СНЭЭ.

Вторая глава посвящена анализу характерного графика нагрузки автономной энергосистемы нефтедобывающего предприятия и формулированию требований к системе автоматического регулирования частоты. С этой целью проводился мониторинг на дизель-генераторной электростанции мощностью 3000 кВт, номинальным напряжением 6,3 кВ, питающей кустовую площадку, где основным потребителем является буровая установка БУ 4500/270 ЭК-БМ.

Обработка результатов мониторинга, выполненная с привлечением теории мгновенной мощности Х. Акаги, позволила получить полную картину процессов в энергосистеме на протяжении 96 ч регистрации при выполнении обычных технологических операций. На рисунке 1 приведены графики активной мощности и частоты. В таблице 1 представлены обобщённые параметры результатов мониторинга по частоте.

В течение 96 ч мощность нагрузки изменялась от 50 до 2300 кВт. В течение 96 ч. Зарегистрировано более 100 бросков мощности, превышающих 30 % номинальной мощности электростанции. Во многих случаях эти броски превышают 70 % предшествующей моменту коммутации нагрузки. Такой режим работы приемлем для ДГУ, но недопустим для ГПУ. Поэтому электростанция, укомплектованная ГПУ и работающая по идентичному графику нагрузки, должна иметь увеличенную установленную мощность генераторных агрегатов.

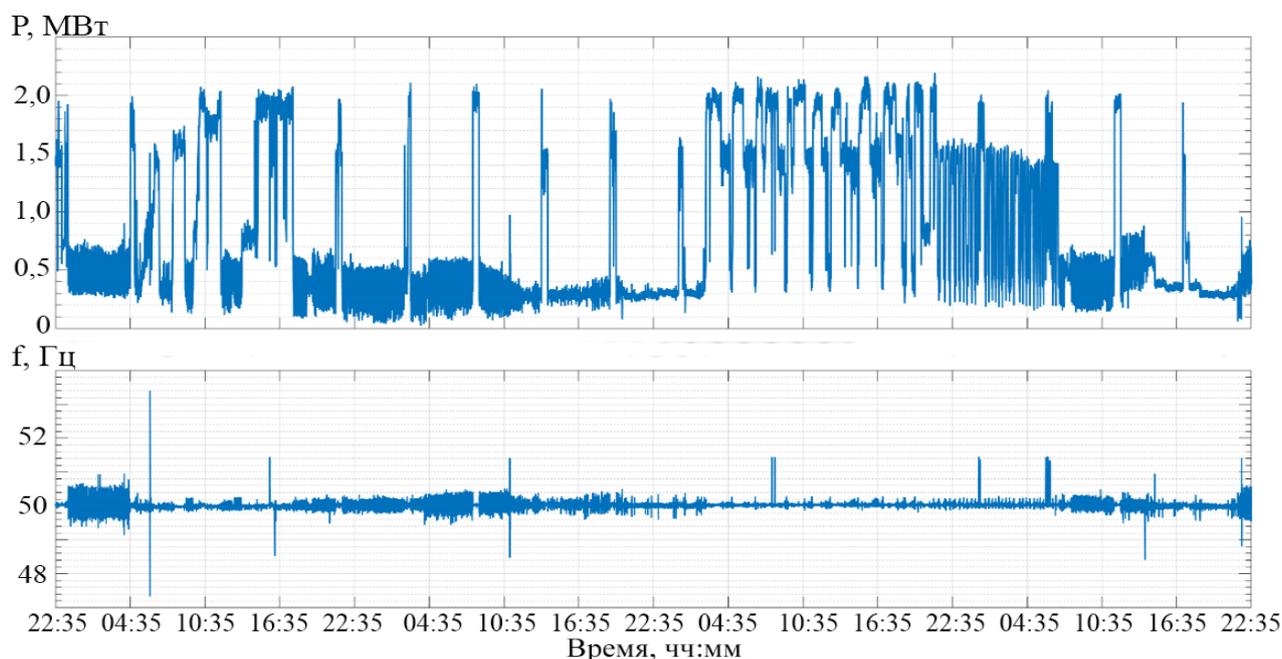


Рисунок 1 – Нагрузочная диаграмма электростанции и график частоты

Таблица 1 – Результаты мониторинга по частоте

Наименование параметра	Ед. изм.	Значение
Среднее значение частоты	Гц	50,0155
Минимальное значение частоты	Гц	47,3200
Максимальное значение частоты	Гц	53,4060
Среднеквадратическое отклонение (СКО) частоты	Гц	0,0435
СКО скорости изменения частоты	Гц/с	0,1579

Анализ результатов показывает, что в целом регуляторы скорости ДГУ справляются с задачей поддержания частоты. В то же время наибольшее отклонение частоты превышает 3,4 Гц. Однако даже такое отклонение не превышает предельно допустимое значение по ГОСТ 32144: ± 5 Гц. Многократно за время проведения мониторинга отклонение частоты превышало величину 1 Гц, но общее время такого превышения укладывается в интервал времени менее 5 %, что также соответствует ГОСТ.

При этом кратковременные, но значительные отклонения частоты, происходящие с высокой скоростью, приводят к ускоренному износу генераторных агрегатов и электродвигателей потребителей, к снижению надёжности и производительности технологического оборудования. Поэтому при наличии в автономных энергосистемах высокотехнологичных электроприёмников, чувствительных к качеству электроэнергии, собственниками нередко устанавливаются более жесткие требования к частоте, чем указанные в ГОСТ.

В работе сформулированы требования к системе автоматического регулирования частоты, которая должна обеспечивать эффективную работу электроприёмников и допустимый режим работы для традиционных генераторных агрегатов, преобразователей СНЭЭ и ВИЭ.

Для обеспечения возможности применения системы регулирования при наличии электроприёмников и генераторных установок, чувствительных к изменениям частоты, предлагается ограничить максимальное отклонение частоты пределом, действующим в 1 синхронной зоне ЕЭС России: $\pm 0,2$ Гц (при условии готовности СНЭЭ участвовать в управлении активной мощностью).

Третья глава посвящена разработке алгоритмов управления СНЭЭ для стабилизации частоты в автономной энергосистеме с традиционными генераторами. Для апробации алгоритмов управления в среде MATLAB/Simulink разработана математическая модель автономной энергосистемы в составе: ДГУ, СНЭЭ, нагрузка (с возможностью задания произвольной нагрузочной диаграммы).

Алгоритм управления СНЭЭ по возмущению (*алгоритм № 1*) предназначен для сглаживания набросов и сбросов нагрузки. Алгоритм обеспечивает компенсацию небаланса мощности по факту его возникновения, пока частота ещё не успела отклониться. Структурная схема алгоритма представлена на рисунке 2. Зона нечувствительности позволяет сохранить ресурс СНЭЭ.

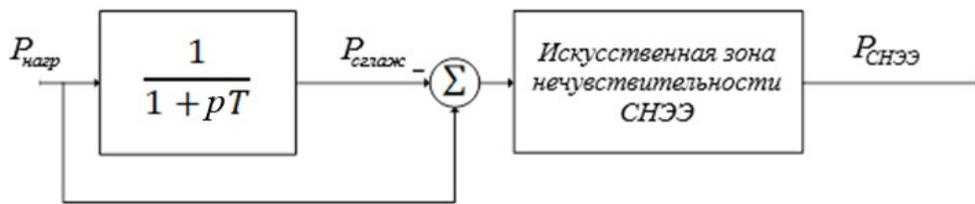


Рисунок 2 – Структурная схема алгоритма управления № 1

На рисунке 3 представлен переходный процесс при скачкообразном изменении нагрузки с 0,2 до 1,0 о.е. и обратно через 13 с в случае, когда СНЭЭ не участвует в регулировании частоты, оно выполняется только средствами ДГУ. На рисунке 4 представлен процесс при аналогичном возмущении при участии в регулировании СНЭЭ с алгоритмом № 1 (ДГУ также участвует в регулировании).

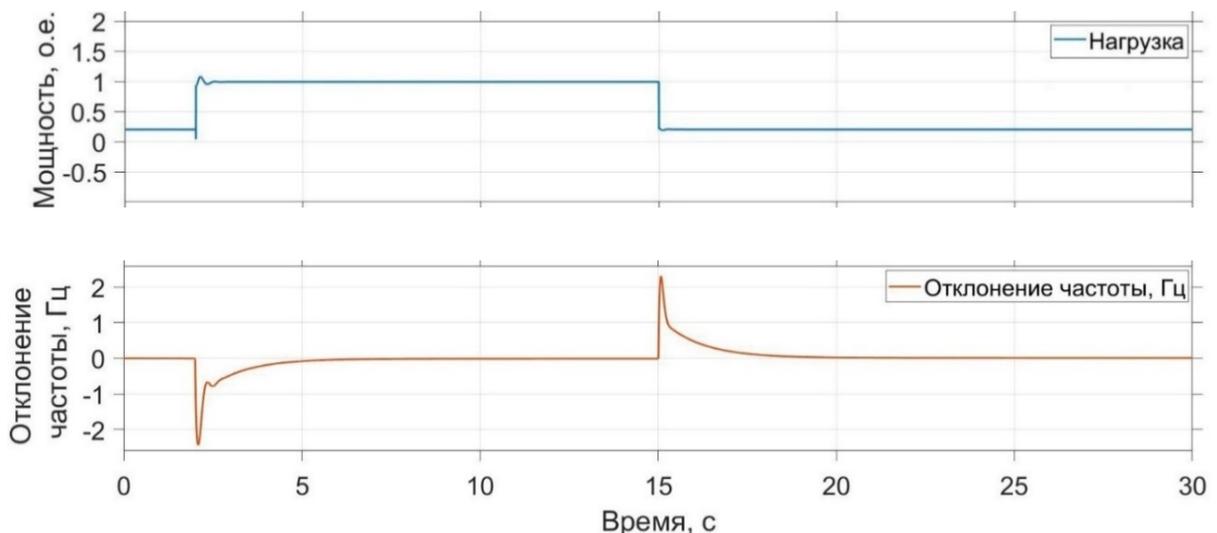


Рисунок 3 – Переходный процесс без участия СНЭЭ в регулировании

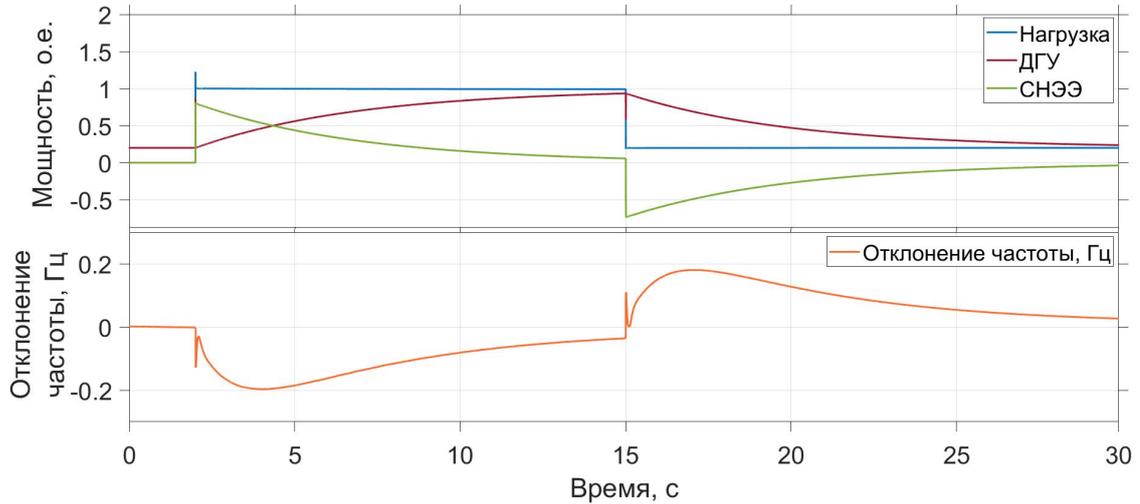


Рисунок 4 – Переходный процесс при регулировании по алгоритму № 1

СНЭЭ компенсирует бросок мощности и экспоненциально с постоянной времени T передаёт нагрузку на генераторный агрегат. При этом обеспечивается уменьшение отклонения частоты и её плавное изменение, ограничиваются ударные процессы в ДГУ и механизмах потребителей. Кратковременный бросок частоты в начале переходного процесса обусловлен наличием времени отклика СНЭЭ (5 мс).

Алгоритм управления СНЭЭ по отклонению частоты (*алгоритм № 2*) построен по принципу ПД-регулирования (рисунок 5). Переходный процесс при участии в регулировании СНЭЭ с алгоритмом № 2 представлен на рисунке 6.

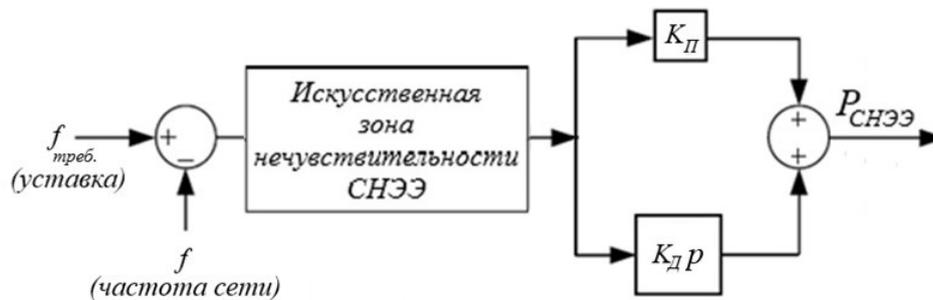


Рисунок 5 – Структурная схема алгоритма управления № 2

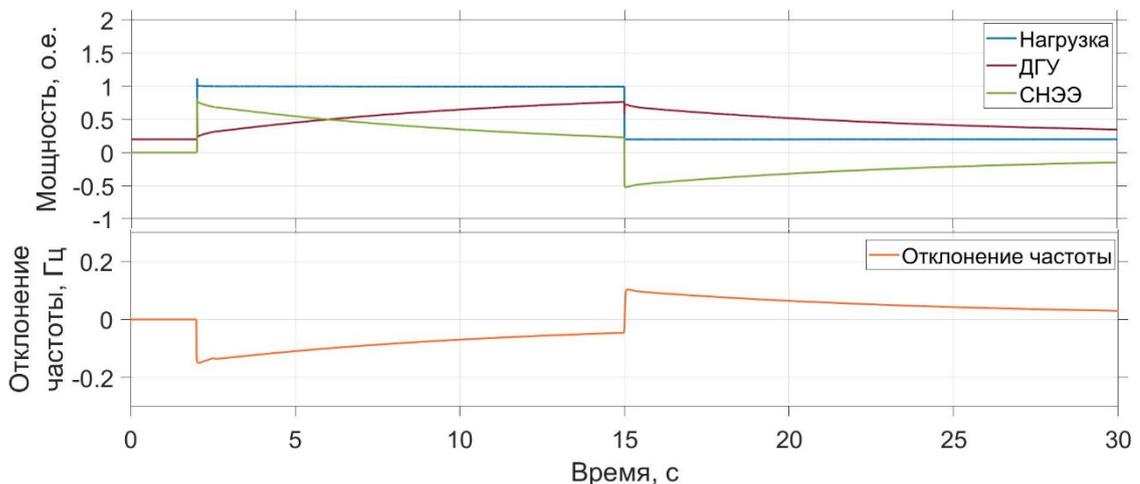


Рисунок 6 – Переходный процесс при регулировании по алгоритму № 2

Отмечается меньшее отклонение частоты, чем при работе по алгоритму № 1, но при этом допускается ударное изменение частоты сразу после возмущения.

Предлагается **алгоритм № 3**, совмещающий управление по возмущению и по отклонению частоты (рисунок 7). Переходный процесс при участии в регулировании СНЭЭ по алгоритму № 3 представлен на рисунке 8.

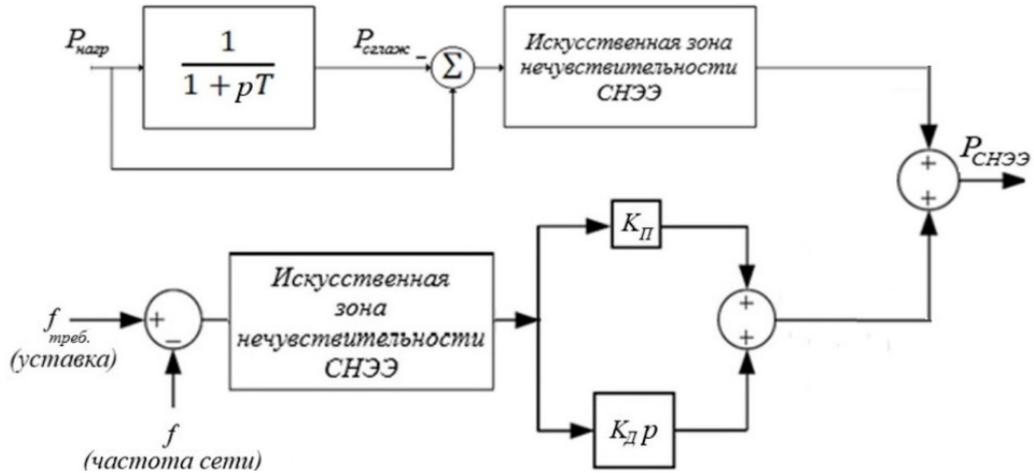


Рисунок 7 – Структурная схема алгоритма управления № 3

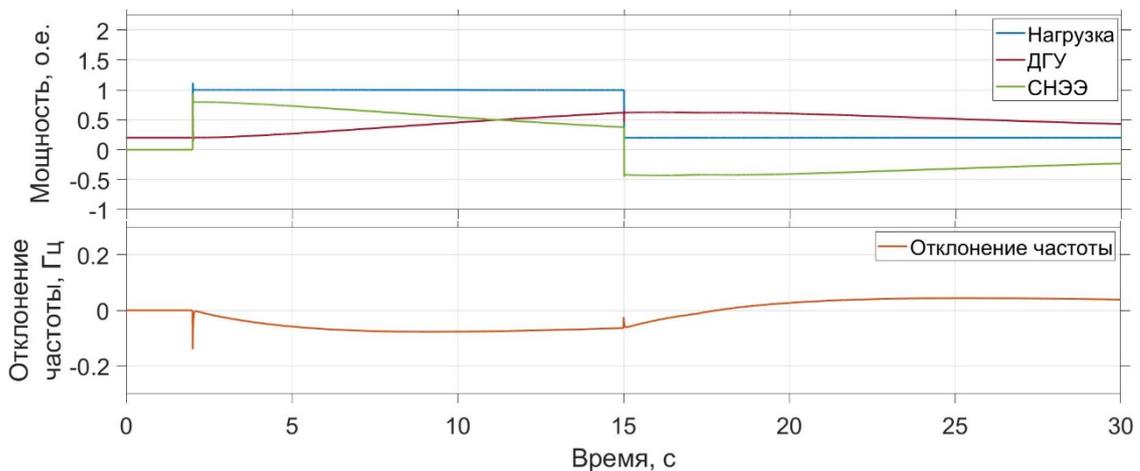


Рисунок 8 – Переходный процесс при регулировании по алгоритму № 3

Предложенный способ комбинирования двух алгоритмов управления ещё больше уменьшает отклонения частоты и исключает её ударные изменения, что критически важно для чувствительных механизмов потребителей и некоторых генераторных агрегатов (например, ГПУ).

Для распределения управляющих воздействий между литий-ионным (ЛИА) и суперконденсаторным (СК) накопителями в составе гибридной СНЭЭ предлагается **алгоритм № 4** с динамическим изменением коэффициентов усиления. Мощности СК и ЛИА в каждый момент времени определяются коэффициентами статизма $K_{СК}$ и $K_{ЛИА}$ (рисунок 9), которые изменяются во времени так, что в первый момент возмущения в регулировании главным образом участвует СК, имеющий большой ресурс по числу циклов заряда-разряда. Далее, в дело постепенно вступает ЛИА, имеющий бóльшую энергоёмкость. Это обеспечивает продление его срока службы.

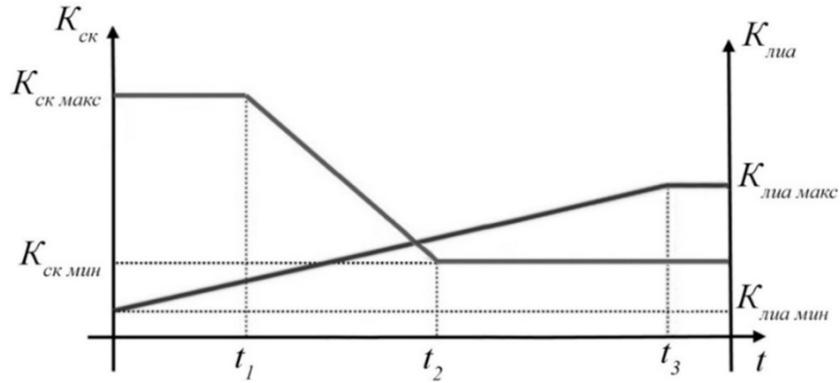


Рисунок 9 – Зависимости коэффициентов статизма СК и ЛИА от времени

Для повышения качества регулирования и более интенсивного использования СК в регулятор вводится дифференцирующее звено (рисунок 10) с коэффициентом, который также изменяется во времени. Так обеспечивается интенсивное участие СК в начале процесса, которое впоследствии замещается действием ЛИА (рисунок 11).

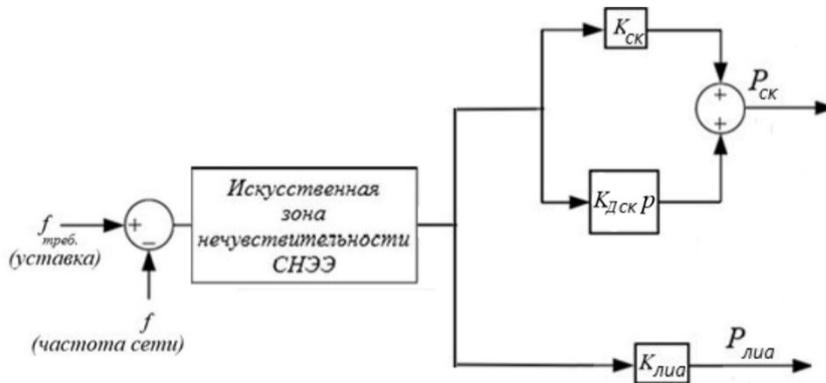


Рисунок 10 – Структурная схема алгоритма управления № 4

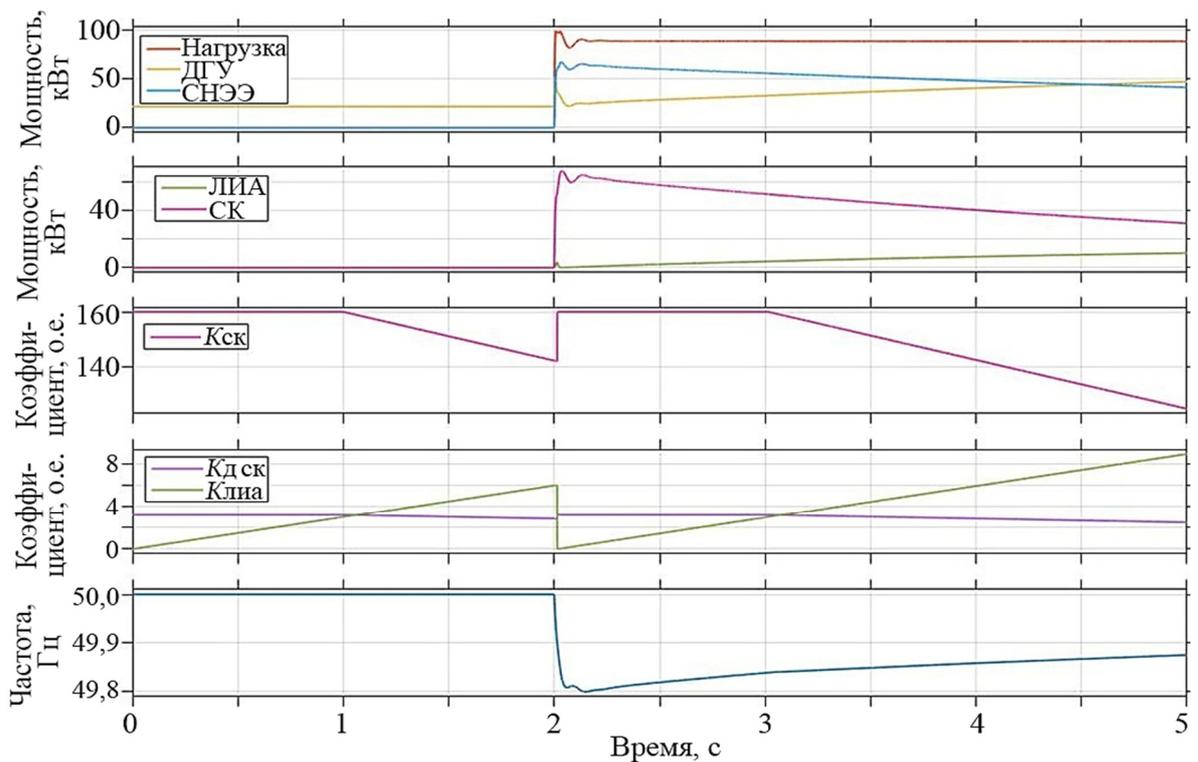


Рисунок 11 – Переходный процесс с гибридной СНЭЭ при набросе нагрузки

Особенностью СНЭЭ является «исчерпаемость» ресурса управления: полностью разряженная или заряженная СНЭЭ ограничена в возможностях энергообмена. Кроме того, выход за пределы рекомендуемого уровня заряда приводит к деградации аккумуляторов и изменению располагаемой мощности СНЭЭ. Для повышения готовности СНЭЭ к участию в процессе управления разработан *алгоритм поддержания уровня заряда накопителя энергии*.

При выходе модуля разности уставки по уровню заряда и текущего уровня заряда за пределы границ k_1 , k_2 , k_3 сигнал требуемой от СНЭЭ мощности P_1' уменьшается (если ниже границы) или увеличивается (если выше границы) на поправочный коэффициент a , b , c (рисунок 12).

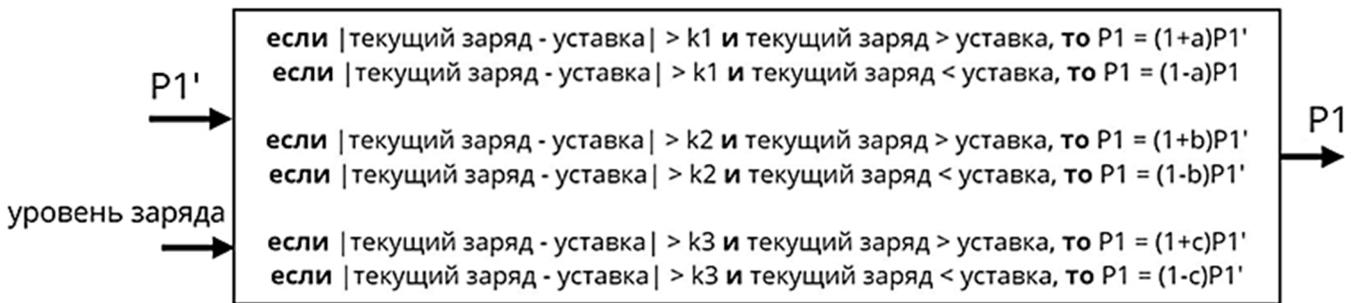


Рисунок 12 – Алгоритм поддержания уровня заряда

За счет преднамеренного ограничения участия СНЭЭ в регулировании частоты обеспечивается поддержание уровня заряда с приемлемым ущербом для качества регулирования (рисунок 13). Уровень заряда в приведённом примере колеблется вокруг некоторого значения, в то время как при отсутствии алгоритма уровень заряда постоянно снижается и к концу расчетного периода оказывается на 20 % ниже, чем при наличии алгоритма.

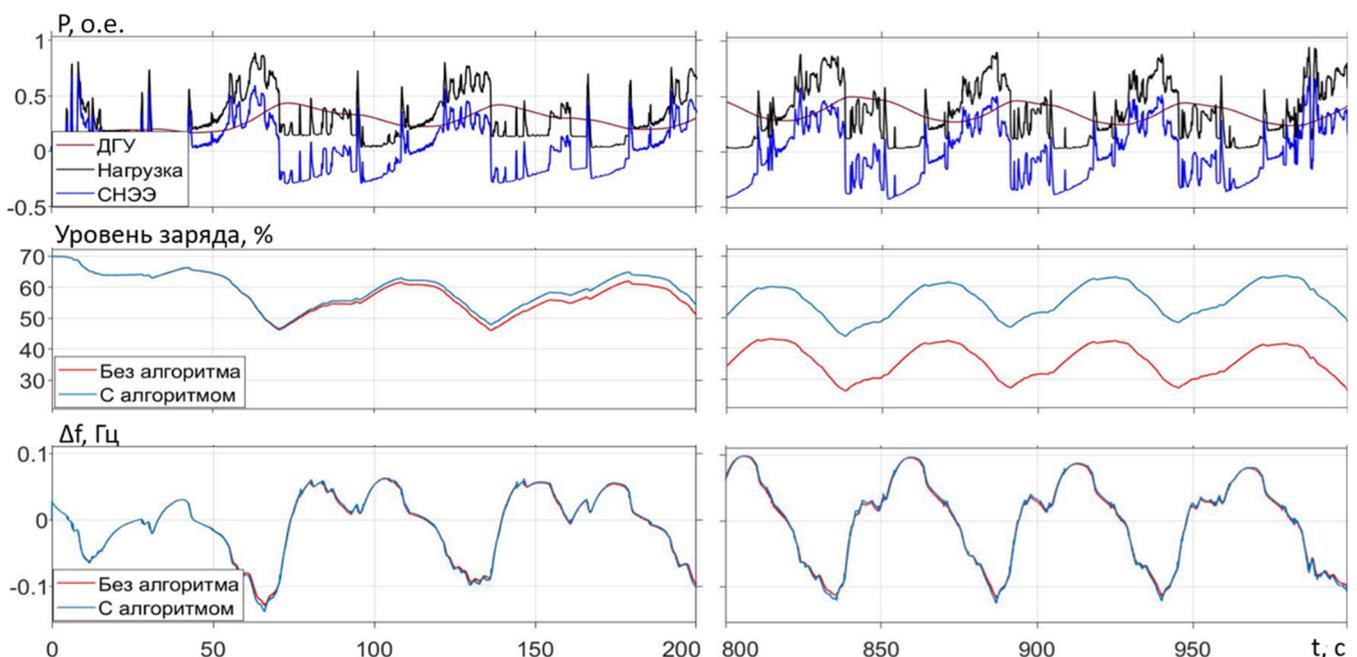


Рисунок 13 – Переходный процесс в энергосистеме с применением алгоритма поддержания уровня заряда СНЭЭ и без него

Четвертая глава посвящена разработке алгоритмов управления для стабилизации частоты в энергосистеме с автономной гибридной энергоустановкой (АГЭУ). Для тестирования алгоритмов состав модели автономной энергосистемы в среде MATLAB/Simulink дополнен солнечной электростанцией (СЭС).

Архитектура разработанной системы автоматического регулирования частоты представлена на рисунке 14.

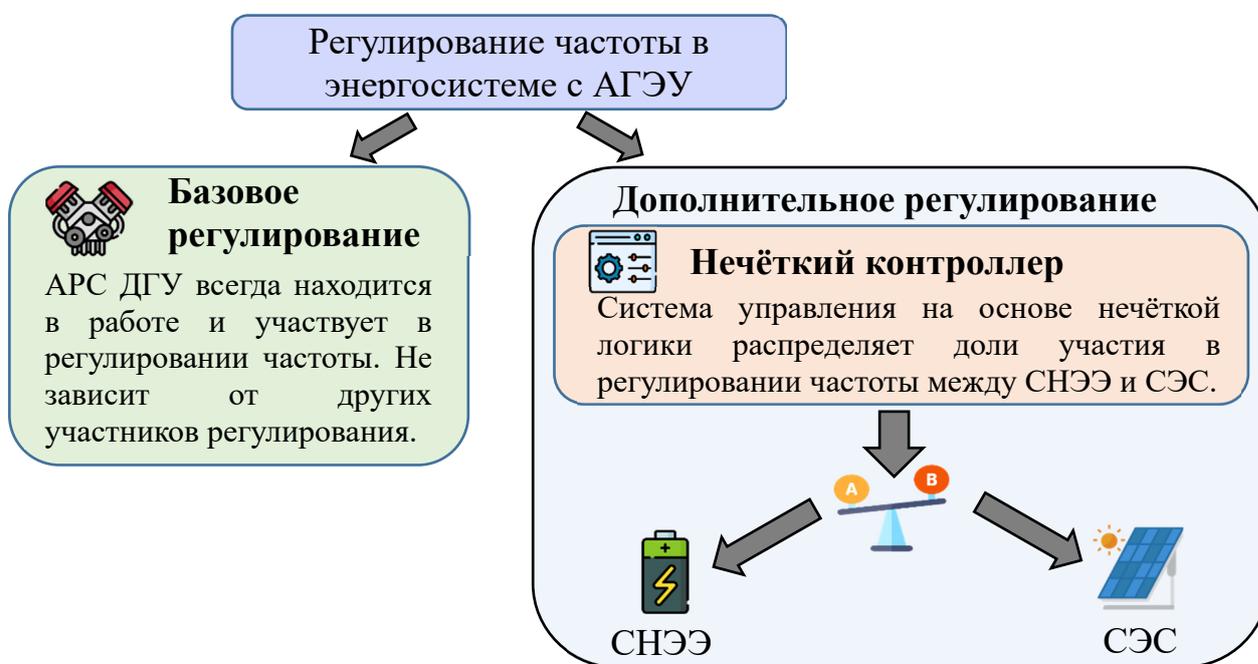


Рисунок 14 – Архитектура системы автоматического регулирования частоты

Для реализации предлагаемой системы регулирования каждый источник энергии в составе АГЭУ должен иметь собственный регулятор частоты. В работе предложен *способ выбора их настроечных параметров*, в основе которого лежит оптимизация (минимизация) целевой функции. Для каждого источника энергии в составе АГЭУ выбрана индивидуальная целевая функция.

Поиск минимального значения целевой функции выполняется с помощью инструмента Response Optimization в MATLAB/Simulink. Для решения оптимизационной задачи используется симплекс-метод.

При наличии возможности изменения настроечных параметров регулятора скорости ДГУ, в качестве целевой функции предлагается использовать интеграл взвешенной по времени абсолютной ошибки:

$$C = \int (|f_0 - f|)^2 \times t) dt, \quad C \rightarrow \min, \quad (1)$$

где f_0 – номинальная частота; f – текущее значение частоты; t – время.

В первый момент времени после возмущения основная роль в регулировании частоты принадлежит СНЭЭ. Для ДГУ важно обеспечить поддержание минимального значения отклонения частоты на более длительных интервалах времени. Выбранная функция подразумевает умножение значения отклонения

частоты на продолжительность отклонения, что уменьшает влияние возмущения в первый момент времени его возникновения на значение целевой функции.

Для СНЭЭ в качестве целевой функции выбрана разность между желаемой обменной энергоёмкостью $E_{\text{жел}}$ и энергоёмкостью $E_{\text{обм}}$, использованной в регулировании:

$$C = |E_{\text{жел}} - E_{\text{обм}}|, \quad C \rightarrow \min \quad (2)$$

Ограничение участия СНЭЭ по желаемой энергоёмкости позволит сохранить ресурс аккумуляторов. При этом может быть установлено любое значение желаемой энергоёмкости, которое обеспечит требуемые параметры по частоте.

Регулирование частоты для СЭС не является основной задачей, поэтому СЭС участвует в регулировании частоты не постоянно, а по необходимости. Целевая функция представляет собой разность между желаемым (требуемым) отклонением частоты $\Delta f_{\text{жел}}$ и максимальным зафиксированным отклонением частоты в расчёте:

$$C = |\Delta f_{\text{жел}} - |(f - f_0)| |, \quad C \rightarrow \min \quad (3)$$

Для обеспечения рационального использования ресурсов СНЭЭ, традиционной генерации и СЭС в процессе регулирования частоты разработан *алгоритм координации совместной работы разнородных источников энергии в составе АГЭУ*, который предполагает перераспределение доли участия источников энергии в регулировании в зависимости от текущей схемно-режимной ситуации.

Коэффициенты участия СНЭЭ и СЭС в регулировании частоты могут меняться в диапазоне от 0 до 1, но их сумма остаётся равной 1. ДГУ всегда участвует в регулировании, термин «коэффициент участия» к ней не применяется.

Алгоритм распределения участия в регулировании между СНЭЭ и СЭС реализован на нечёткой логике. На основе функций принадлежности и набора правил формируется зависимость коэффициента участия от уровня заряда. При удалении уровня заряда от желаемого значения и приближении к границам рабочего диапазона доля участия СНЭЭ снижается. Алгоритм реализован средствами MATLAB для создания нечетких контроллеров: Fuzzy Logic Toolbox.

Предлагаемый алгоритм может предусматривать адаптивный запас по располагаемой мощности СЭС, чтобы иметь возможность задействовать её в регулировании частоты в случае необходимости. Коэффициент запаса мощности СЭС увеличивается со снижением инсоляции так, чтобы в абсолютных значениях запас располагаемой мощности оставался неизменным.

Нечёткий контроллер, опираясь на уровень заряда СНЭЭ, определяет коэффициент участия СНЭЭ в регулировании, а также тип и коэффициент участия СЭС в регулировании. При типе регулирования «0» СЭС не участвует в регулировании. При «1» – участвует в регулировании. В последнем случае используется возможность регулирования как на повышение мощности СЭС, так и

на понижение. При промежуточных значениях СЭС только снижает мощность.

В рамках *исследования эффективности разработанной системы автоматического регулирования частоты* выполнена серия расчетных экспериментов на модели автономной энергосистемы.

Рассмотрены 4 варианта конфигурации источников энергии и настроек их регуляторов частоты:

1. ДГУ – регулятор с типовыми настройками (вариант 1);
2. ДГУ – регулятор оптимизирован (вариант 2);
3. ДГУ – регулятор с типовыми настройками; СНЭЭ, СЭС – регуляторы оптимизированы (вариант 3);
4. ДГУ, СНЭЭ, СЭС – все регуляторы оптимизированы (вариант 4).

Расчеты выполнены для графиков нагрузки, соответствующих режимам работы электродвигателей S4, S5, S7 по ГОСТ IEC 60034-1, а также нагрузочной диаграммы дизельной электростанции в автономной энергосистеме, основными потребителями которой являются электроприводы механизмов подъёмного крана КПЛ 18-82. Данный тип нагрузки выбран для исследования, так как подъёмные механизмы циклического действия (в частности, подъёмные краны) характеризуются одной из самых высоких степеней неравномерности графика энергопотребления среди всех потребителей в автономных энергосистемах.

В таблице 2 приведены обобщенные интегральные параметры по частоте, позволяющие оценить эффективность работы алгоритмов регулирования. На рисунке 15 представлены результаты расчета переходных процессов при работе ДГУ, СНЭЭ, СЭС с оптимизированными регуляторами по графику нагрузки подъёмного крана. Положительному значению мощности СНЭЭ соответствует поглощение мощности из энергосистемы.

Таблица 2 – Обобщенные интегральные параметры по частоте

Параметр	Конфигурация генерации			
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Режим S4				
СКО частоты, Гц	0,539	0,231	0,037	0,029
СКО скорости изменения частоты (ROCOF), Гц/с	2,831	2,760	1,246	1,399
Среднее значение отклонения частоты, Гц	0,168	0,067	0,028	0,022
Максимальное значение отклонения частоты, Гц	3,514	1,741	0,112	0,089
Режим S5				
СКО частоты, Гц	0,619	0,250	0,052	0,040
СКО ROCOF, Гц/с	3,034	2,721	1,120	1,293
Среднее значение отклонения частоты, Гц	0,197	0,070	0,038	0,029
Максимальное значение отклонения частоты, Гц	4,342	2,161	0,127	0,099

Параметр	Конфигурация генерации			
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Режим S7				
СКО частоты, Гц	0,423	0,140	0,016	0,015
СКО ROCOF, Гц/с	0,718	0,340	0,005	0,006
Среднее значение отклонения частоты, Гц	0,164	0,054	0,011	0,010
Максимальное значение отклонения частоты, Гц	3,248	1,038	0,050	0,045
График нагрузки подъёмного крана КПЛ 18-82				
СКО частоты, Гц	0,757	0,316	0,055	0,035
СКО ROCOF, Гц/с	2,829	1,603	0,052	0,054
Среднее значение отклонения частоты, Гц	0,473	0,254	0,044	0,029
Максимальное значение отклонения частоты, Гц	4,533	1,151	0,137	0,086

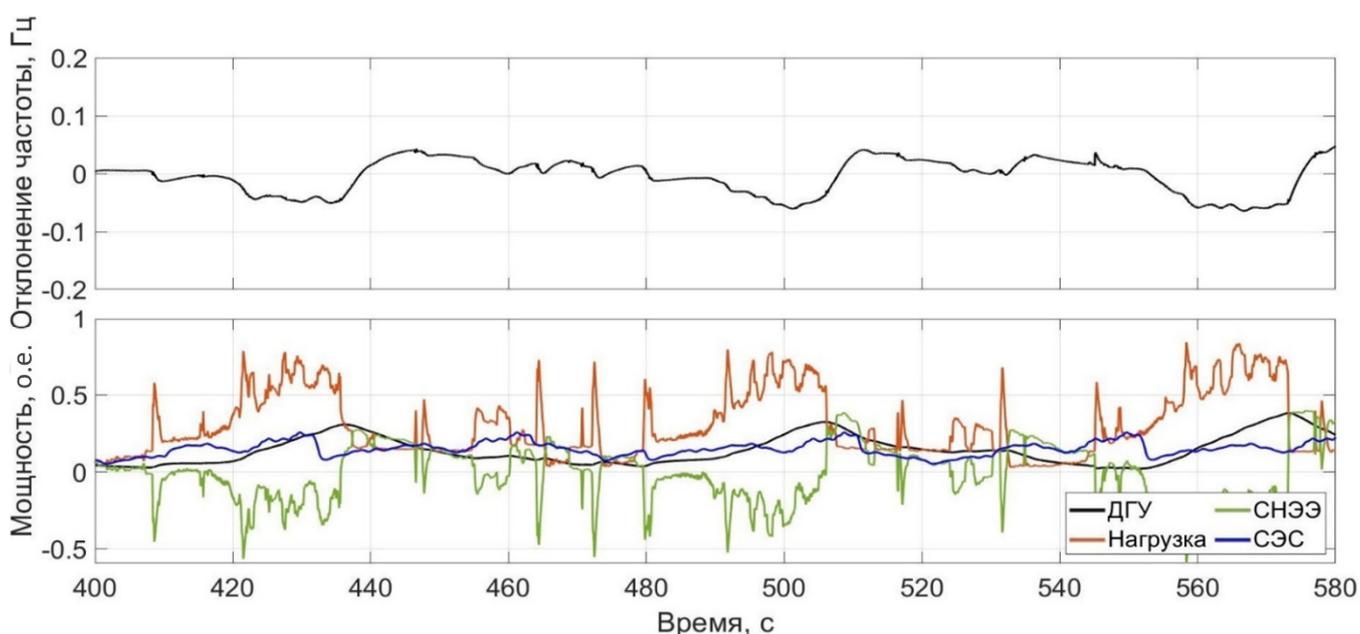


Рисунок 15 – Результаты расчета переходных процессов при работе с графиком нагрузки подъёмного крана (Вариант 4)

Сравнение вариантов 1 и 2 показывает, что, даже не вводя дополнительных средств регулирования частоты, можно улучшить показатели качества электроэнергии по частоте за счёт оптимизации параметров регулятора ДГУ.

Однако привлечение дополнительных источников энергии к регулированию (варианты 3 и 4) улучшает показатели ещё на порядок, что важно при наличии чувствительных электроприёмников или генераторных установок (например, ГПУ), а значит, соответствующих требований заказчика. Преобразователи в составе СНЭЭ и СЭС выполнены на силовых транзисторах и имеют высокое быстродействие, что делает их практически безынерционными по сравнению с ДГУ. Разработанная система автоматического регулирования позволяет максимально использовать эти преимущества.

На практике не всегда имеется возможность изменить настроечные параметры АРС ДГУ. Расчёты показывают, что при оптимизации всех регуляторов максимальное отклонение частоты уменьшается на 37 % (при работе с графиком нагрузки подъёмного крана) по сравнению со случаем, когда оптимизированы только регуляторы СЭС и СНЭЭ. То есть оптимизация параметров АРС ДГУ может быть полезной, но не является обязательной: даже без неё при наличии СЭС и СНЭЭ с оптимизированными регуляторами обеспечивается отклонение частоты, не превышающее 0,2 Гц.

Следует отметить, что при оптимизации параметров регулятора СНЭЭ было получено значение обменной энергоемкости, равное 0,5 % от номинальной энергоемкости, определяемой основной функцией СНЭЭ – согласованием стохастических графиков солнечной генерации и нагрузки. Такое малое значение энергоемкости для участия в регулировании частоты практически не влияет на выполнение СНЭЭ своей основной функции и исключает сколь-нибудь заметное влияние участия в регулировании частоты на ресурс аккумуляторных батарей.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы. В **приложениях** содержатся 2 патента на изобретения, свидетельство о регистрации программы для ЭВМ, 2 акта о внедрении результатов диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Показано, что СНЭЭ являются востребованным, высокоэффективным и быстродействующим средством регулирования частоты. В 55 % проектов СНЭЭ по всему миру предусмотрено участие в регулировании частоты. Как правило, это является их дополнительной функцией. В России СНЭЭ являются перспективным решением, прежде всего, для автономных энергосистем. Но, несмотря на реализацию ряда проектов, в РФ к регулированию частоты СНЭЭ не привлекаются.

2. Проведён анализ результатов мониторинга режимных параметров в системе электроснабжения буровой установки. На отрезке 96 ч выявлено более 100 бросков нагрузки величиной от 30 % номинальной мощности, в том числе выше 70 %. Отклонение частоты многократно превышает 1 Гц, максимальное отклонение достигает 3,41 Гц, что не противоречит требованиям ГОСТ 32144, но ведёт к негативным последствиям для оборудования потребителей и генераторных установок. В связи с этим собственники энергообъектов нередко устанавливают более жесткие требования к частоте, чем ГОСТ.

3. Сформулированы требования к системе регулирования частоты. Для обеспечения её эффективности на объектах с чувствительными потребителями и генераторными установками, поставлена задача ограничить с помощью СНЭЭ максимальное отклонение частоты значением не более $\pm 0,2$ Гц, что соответствует требованию, установленному для 1 синхронной зоны ЕЭС России.

4. Для апробации алгоритмов управления в среде MATLAB/Simulink составлена модель автономной энергосистемы, включающей ДГУ, СЭС, СНЭЭ и нагрузку с возможностью задания произвольного графика энергопотребления.

5. Предложен новый способ регулирования частоты в автономной энергосистеме с помощью СНЭЭ, сочетающий управление по возмущению и отклонению частоты, который позволяет исключить ударные изменения частоты, особенно опасные для чувствительного электрооборудования, и уменьшить её отклонения до уровня, установленного в 1 синхронной зоне ЕЭС России.

6. Разработан алгоритм распределения во времени долей участия в регулировании частоты накопителей энергии разных типов в составе гибридной СНЭЭ за счёт динамического изменения коэффициентов усиления, способствующий экономии ресурса аккумулирующих элементов.

7. Предложен новый способ и разработан алгоритм автоматического поддержания уровня заряда накопителя энергии за счет коррекции управляющего воздействия в зависимости от фактического уровня заряда.

8. Впервые предложена концепция исполнения системы автоматического регулирования частоты в энергосистеме с АГЭУ с использованием возможностей СНЭЭ и традиционной генерации, с созданием резерва мощности СЭС (когда СНЭЭ не может участвовать в регулировании) и распределением управляющих воздействий между СНЭЭ и СЭС в зависимости от уровня заряда накопителя. Предложена процедура выбора настроечных параметров регуляторов частоты.

9. Показана эффективность алгоритмов управления на математической модели автономной энергосистемы с нагрузочными диаграммами по ГОСТ ИЕС 60034-1 и с резкопеременным графиком энергопотребления промышленного объекта. При участии СНЭЭ в регулировании максимальное отклонение частоты в зависимости от расчётного графика нагрузки и параметров регулятора ДГУ составило от 0,045 до 0,137 Гц, что на порядок лучше варианта, когда регулирование выполняется только средствами ДГУ (максимальное отклонение от 1,038 до 4,533 Гц). Благодаря алгоритму поддержания уровня заряда и небольшому значению энергоёмкости, задействованной в регулировании, привлечение СНЭЭ к регулированию не требует дополнительных капитальных вложений, но позволяет удовлетворить индивидуальные требования электропотребителей, чувствительных к отклонениям частоты и расширить область применения АГЭУ и газопоршневых электростанций в автономных энергосистемах с резкопеременной нагрузкой.

10. Продолжение и дальнейшее развитие работы связано с учётом дополнительных факторов при перераспределении управляющих воздействий между СЭС и СНЭЭ и с решением задач по воплощению разработанной системы регулирования в виде программно-аппаратного решения. В частности, с реализацией алгоритмов на промышленном контроллере и его интеграцией в электродинамическую модель энергосистемы.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях (Перечень ВАК РФ):

1. **Нестеренко Г. Б.** Проблемы, перспективы применения и методика расчета нормированной стоимости накопления электрической энергии = Problems, aspects of application and the method of calculating the levelized cost of storage / В. Д. Мельников, Г. Б. Нестеренко, Д. Е. Лебедев, Ю. В. Мокроусова, А. В. Удовиченко // Вестник Казанского государственного энергетического университета. - 2019. - Т. 11, № 4 (44) - С. 30-36.

2. **Нестеренко Г. Б.** Испытания промышленного образца системы накопления энергии СНЭ-10-1200-400 при совместной работе с ГПУ в составе экспериментальной энергосистемы + Testing of industrial design energy storage system (ESS-10-1200-400) and gas piston units in experimental power system / П. А. Бачурин, Д. С. Гладков, В. М. Зырянов, С. В. Кучак, Д. Е. Лебедев, Г. Б. Нестеренко, Г. А. Пранкевич, А. Н. Решетников, А. М. Савицкий // Электроэнергия. Передача и распределение. - 2020. - № 2 (59). - С. 18-24.

3. **Нестеренко Г. Б.** Системы накопления энергии: российский и зарубежный опыт = Energy storage systems: russian and international experience / В. М. Зырянов, Н. Г. Кирьянова, И. Ю. Коротков, Г. Б. Нестеренко, Г. А. Пранкевич // Энергетическая политика. - 2020. - №6 (148). - С. 76-87.

4. **Нестеренко Г. Б.** Оценка точности математической модели системы накопления энергии по результатам натурного эксперимента на газопоршневой электростанции / В. В. Гужавина, Г. Б. Нестеренко, Г. А. Пранкевич, П. А. Бачурин, Д. С. Гладков, В. М. Зырянов // Электроэнергия. Передача и распределение. - 2020. - № 5 (62). - С. 58-63.

5. **Нестеренко Г. Б.** Исследование эффективности применения системы накопления электрической энергии в составе автономной гибридной энергоустановки для регулирования частоты = Efficiency analysis of electrical energy storage system as part of an autonomous hybrid power plant for frequency control / Г. Б. Нестеренко, Д. В. Армеев, Д. С. Гладков, В. М. Зырянов, А. В. Мячина // Электроэнергия. Передача и распределение. - 2022. - № 6 (75). - С. 76-83.

Публикации в научных изданиях, индексируемых в Scopus, Web of Science:

6. **Nesterenko G. B.** Calculation of the levelised cost of electrical energy storage for short-duration application. LCOS sensitivity analysis / V. D. Melnikov, G. B. Nesterenko, A. M. Potapenko, D. E. Lebedev // EAI Endorsed Transactions on Energy Web and Information Technologies. - 2019. - Iss. 21. - Art. ew 19: e2 (4 p.) - DOI: 10.4108/eai.13-7-2018.155643.

7. **Nesterenko G. B.** Mathematical model of energy storage for the calculation of electromechanical processes in power systems / V. M. Zyryanov, N. G. Kiryanova,

G. B. Nesterenko, A. M. Potapenko, G. A. Prankevich // EAI Endorsed Transactions on Energy Web and Information Technologies. - 2019. - Iss. 21. - Art. ew 19: e4 (5p.) - DOI: 10.4108/ eai.13-7-2018.155645.

8. **Nesterenko G. B.** Electrical energy storage systems for increasing technical and economical characteristics of gas engine power plants / S. A. Eroshenko, V. D. Melnikov, G. B. Nesterenko, V. M. Zyryanov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2020. - Vol. 836 : 4 International Conference on Reliability Engineering (ICRE 2019). - Art. 012007 (5 p.). - DOI: 10.1088/1757-899X/836/1/012007.

9. **Nesterenko G. B.** Identification of parameters for the hybrid electrical energy storage system in autonomous power system / S. A. Eroshenko, G. B. Nesterenko, V. M. Zyryanov, N. G. Kiryanova, G. A. Prankevich // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2020. - Vol. 836 : 4 International Conference on Reliability Engineering (ICRE 2019). - Art. 012008 (5 p.). - DOI: 10.1088/1757-899X/836/1/012008.

10. **Nesterenko G. B.** Technical and economic efficiency analysis of the energy storage systems use in off-grid power systems / G. B. Nesterenko, G. A. Prankevich, S. A. Eroshenko, R. S. Chuvashov, V. M. Zyryanov // Proceedings of the 7 international conference on electrical energy systems (ICEES 2021), India, Chennai, 11–13 Febr. 2021: virtual conf. – Chennai : IEEE, 2021. – P. 68-72. – DOI: 10.1109/ICEES51510.2021.9383742.

11. **Nesterenko G. B.** Adaptive Frequency Control Algorithm In Off-Grid Power System Based On Photovoltaic Diesel Hybrid System And Energy Storage / G. B. Nesterenko, D. V. Armeev, D. S. Gladkov, V. M. Zyryanov, J. V. Mokrousova, A. V. Myachina // 7 International Energy Conference (ENERGYCON-2022), Latvia, Riga, 9-12 May 2022. - IEEE, 2022. - 4 p. - DOI 10.1109/ENERGYCON53164.2022.9830511.

12. **Nesterenko G. B.** Analysis of the frequency deviation in off-grid power system of oil field / G. B. Nesterenko, V. S. Vakulenko, V. M. Zyryanov, A. M. Potapenko, G. A. Prankevich, M. K. Aleksandrov // Energy Reports. – 2022. – Vol. 8, iss. 10 (suppl.) : 4 International Conference on Clean Energy and Electrical Systems (CEES–2022), Japan, Tokyo, 2–4 Apr. 2022.– P. 831–838 – DOI 10.1016/j.egy.2022.05.272.

Публикации в других изданиях:

13. **Nesterenko G. B.** Application of electrical energy storage system for limitation of abrupt load power changes / G. B. Nesterenko, G. A. Prankevich, V. M. Zyryanov ; research adviser T. G. Krasilnikova, language adviser E. T. Kitova // Aspire to Science : материалы междунар. науч. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Новосибирск, 18 апр. 2019 г. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2019. – С. 198–202. – 20 экз. – ISBN 978-5-7782-3935-7.

14. **Нестеренко Г. Б.** Анализ целесообразности применения системы накопления электрической энергии на основе моделирования = Feasibility analysis

of electrical energy storage system application on the base of modelling / Г. Б. Нестеренко, В. М. Зырянов, Д. О. Крюков, Н. Г. Кирьянова, Г. А. Пранкевич // Электроэнергетика глазами молодежи – 2019 : материалы юбилейн. 10 междунар. молодеж. науч.-техн. конф., Иркутск, 16–20 сент. 2019 г. В 3 т. – Иркутск : Изд-во ИРНТУ, 2019. – Т. 3. – С. 56–59. - 300 экз. - ISBN 978-5-8038-1436-8.

15. **Нестеренко Г. Б.** Применение систем накопления энергии для интеграции солнечных электростанций в традиционные энергосистемы / В. М. Зырянов, А. В. Мячина, Г. Б. Нестеренко // Вести в электроэнергетике = News electric power.- 2020. - № 5 (109). - С. 47-58.

16. **Нестеренко Г. Б.** Анализ качества электрической энергии в точке подключения сетевой солнечной электростанции / В. М. Зырянов, А. В. Мячина, Г. Б. Нестеренко. // Энергоэксперт. – 2021. – № 3 (79). – С. 62–66.

Патенты на изобретения Российской Федерации:

17. Патент 2736701. Российская Федерация, МПК G06N 7/00(2006.01). Система и способ построения модели энергосистемы и проведения расчетов режимов энергосистемы и модель системы накопления электрической энергии, предназначенная для включения в систему / **Нестеренко Г. Б.**, Зырянов В. М., Пранкевич Г. А., Удовиченко А. В., Гужавина В. В.; Заявка: 2020113079, 2020.04.08; Опубликовано: 2020.11.19.

18. Патент 2783040. Российская Федерация, МПК H02J 15/00. Способ регулирования частоты в автономной энергосистеме, включающей систему накопления электрической энергии / **Нестеренко Г. Б.**, Армеев Д. В., Гладков Д. С., Зырянов В. М., Пранкевич Г. А.; Заявка 2022115473, 2022.06.08; Опубликовано: 2022.11.08.

Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ:

19. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2022667812. Российская Федерация, МПК H99. Программа расчёта активной, реактивной мощности и частоты по мгновенным значениям токов и напряжений, полученным в результате мониторинга / **Нестеренко Г. Б.**, Зырянов В. М., Пранкевич Г. А., Армеев Д. В.; Заявка 2022667324, 2022.09.27; Опубликовано: 2022.09.27.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета

630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Тел. 8(383) 346-08-57

Формат 60x84 1/16. Объем 1,5 п.л. Тираж 100 экз.

Заказ № 3446. Подписано в печать 16.06.2023 г.