

ОТЗЫВ

официального оппонента кандидата технических наук, доцента Смоленцева Николая Ивановича на диссертацию **Нестеренко Глеба Борисовича** на тему «Разработка способов и алгоритмов управления накопителями энергии для стабилизации частоты в автономных энергосистемах», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.3 — Электроэнергетика

Актуальность темы диссертации. Системы накопления электрической энергии (СНЭЭ) в последние десятилетия являются одним из наиболее активно развивающихся направлений мировой и российской энергетики. Мировой опыт, во-первых, свидетельствует о многофункциональности СНЭЭ, а во-вторых, показывает, что одной из ключевых задач систем накопления в реализованных проектах является участие в регулировании частоты в энергосистеме. В РФ СНЭЭ не задействованы в стабилизации частоты ни в ЕЭС России, ни в автономных энергосистемах. Это не позволяет использовать их потенциал в полной мере и снижает технико-экономические показатели проектов.

В то же время в удалённых регионах России эксплуатируется множество изолированных систем электроснабжения с автономными генераторными установками (автономных энергосистем), которые в большинстве случаев работают на дизельном топливе и для которых модернизация с применением современных технологий, в том числе СНЭЭ, особенно актуальна. Причиной этому является дорогостоящая логистика при доставке топлива в такие регионы и, соответственно, высокая себестоимость вырабатываемой электроэнергии.

Нередко имеется возможность перевести питание потребителей, особенно промышленных, относящихся к нефтегазовой отрасли, на газопоршневые генераторные установки (ГПУ), работающие на местном топливе. Однако это затруднено особенностью автономных энергосистем промышленных объектов – резкопеременной нагрузкой. Резкие изменения режима работы наиболее крупных электроприёмников, мощность которых сопоставима с установленной мощностью электростанции, приводят к броскам мощности, значительным отклонениям частоты и её ударным изменениям частоты (происходящим с высокой скоростью), что представляет опасность для оборудования потребителей и генераторных установок. Для ГПУ, имеющих инерционный топливный тракт, такой режим работы недопустим. По этой причине организация энергоснабжения подобных энергосистем при помощи ГПУ возможна только с завышением установленной мощности электростанции с целью относительного уменьшения величины броска нагрузки, приходящейся на один генераторный агрегат. Альтернативным решением, исключающим капитальные затраты на дополнительные ГПУ, может выступить СНЭЭ, сглаживающая резкие изменения нагрузки и стабилизирующая частоту.

Актуальным решением, направленным на снижение расходов на дизельное топливо в удалённых районах, являются также автономные гибридные энергоустановки (АГЭУ), включающие в свой состав традиционные генераторы, возобновляемый источник энергии (ВИЭ) и СНЭЭ. АГЭУ достаточно широко применяются в России, но в основном не на промышленных объектах, а для питания бытовой нагрузки, и СНЭЭ в их составе, как правило, используются лишь для обеспечения баланса производимой и потребляемой энергии на суточном интервале времени, к регулированию частоты не привлекаются. Стохастический характер выработки ВИЭ и резкие изменения генерируемой мощности в совокупности с резкопеременным характером промышленной нагрузки усугубляют проблему регулирования частоты и, соответственно, практически исключают применение АГЭУ на объектах такого типа без завышения установленной мощности традиционных генераторов в их составе, что снижает технико-экономические показатели установки. Для исключения этой проблемы целесообразным решением представляется привлечение СНЭЭ, имеющейся в составе АГЭУ, к регулированию частоты.

Для эффективного применения СНЭЭ в решении задачи стабилизации частоты в автономных энергосистемах, особенно с резкопеременной нагрузкой, необходимо разработать систему автоматического регулирования, реализующую алгоритмы управления, адекватные техническим характеристикам СНЭЭ. Это определяет актуальность темы и результатов диссертации с теоретической и практической точек зрения.

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

Для достижения цели в диссертационной работе поставлены и решены следующие **задачи**:

1. выполнен анализ результатов мониторинга режимных параметров электростанции в автономной энергосистеме нефтедобывающего предприятия с резкопеременной нагрузкой;
2. обоснованы и сформулированы требования к системе автоматического регулирования частоты в автономной энергосистеме со СНЭЭ;
3. разработана математическая модель автономной энергосистемы;
4. разработаны алгоритмы управления СНЭЭ для регулирования частоты;
5. разработан алгоритм поддержания уровня заряда СНЭЭ;
6. разработаны алгоритмы управления АГЭУ для регулирования частоты;
7. выполнено исследование эффективности разработанных алгоритмов управления.

Новыми научными результатами являются:

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 значимость диссертационной работы:

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 диссертационной работы:

1. Разработанные алгоритмы управления, позволяющие кардинально уменьшить отклонения частоты в автономных энергосистемах при резкопеременной нагрузке, могут быть использованы при проектировании СНЭЭ. Они позволяют применять ВИЭ и традиционные генераторные установки, чувствительные к резким и глубоким броскам мощности, без превышения установленной мощности электростанции;

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

3. Разработан и зарегистрирован программный продукт для обработки результатов мониторинга режимных параметров энергообъектов;

4. Результаты диссертационной работы **внедрены** в промышленной компании ООО «РЭНЕРА-Энертек» и в учебный процесс Новосибирского государственного технического университета;

5. Работа получила грантовую поддержку Российского фонда фундаментальных исследований и Фонда содействия инновациям.

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 в части:

- 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 комплексе MATLAB/Simulink с использованием математической модели, точность которой подтверждена сопоставлением результатов вычислительных и натуральных экспериментов. Расчёт на модели в комплексе MATLAB/Simulink дал количественное и качественное совпадение с результатами натуральных экспериментов.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах, сессиях и нескольких международных научно-технических конференциях.

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. Результаты диссертационного исследования отражены в публикациях достаточно полно.

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 175 страниц, включает 98 рисунков и 11 таблиц.

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, а также применения СНЭЭ для стабилизации частоты.

Вторая глава посвящена анализу графика нагрузки автономной энергосистемы нефтедобывающего предприятия и формулированию требований к системе автоматического регулирования частоты. Проведён мониторинг режимных параметров дизель-генераторной электростанции мощностью 3000 кВт, питающей кустовую площадку нефтяного месторождения, где основным потребителем является буровая установка БУ 4500/270 ЭК-БМ. Выявлено, что график нагрузки имеет ярко выраженный резкопеременный характер, отклонения частоты имеют значительную амплитуду и ударный характер.

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). Для минимизации максимального отклонения частоты и ликвидации её ударных изменений, предложен способ регулирования частоты, совмещающий управление СНЭЭ по возмущению и по отклонению частоты.

Четвертая глава посвящена разработке алгоритмов управления для стабилизации частоты в энергосистеме с АГЭУ, имеющей в составе ДГУ, СНЭЭ и солнечную электростанцию (СЭС). Модель автономной энергосистемы в MATLAB/Simulink, дополнена СЭС. Предложена концепция

системы автоматического регулирования частоты, в соответствии с которой ДГУ – основное средство регулирования, СНЭЭ – дополнительное средство, СЭС – резервное средство, используемое при выходе уровня заряда СНЭЭ из заданного диапазона. Для определения параметров регуляторов частоты для каждого источника энергии выбрана минимизируемая целевая функция. Выполнен анализ эффективности системы автоматического регулирования частоты на нагрузочных диаграммах по ГОСТ МЭК 60034-1 и резкопеременном графике энергопотребления реального энергообъекта.

В **заключении** сформулированы основные обобщающие выводы по диссертационной работе.

В **приложениях** содержатся копии 2 патентов на изобретения, свидетельства о регистрации программы для ЭВМ, 2 актов о внедрении результатов диссертационной работы.

Таким образом, можно сделать обоснованный вывод о том, что цель диссертации, поставленная соискателем, достигнута.

Автореферат диссертации достаточно полно и точно отражает ее содержание.

Замечания по диссертационной работе:

1. Система автоматического регулирования частоты, в соответствии с которой ДГУ – основное средство регулирования, СНЭЭ – дополнительное средство, СЭС – резервное средство, используемое при выходе уровня заряда СНЭЭ из заданного диапазона может быть неустойчива. Этот вопрос в диссертации не рассматривался.

2. Излишне много ссылок на директивные документы.

3. При рассмотрении гибридной системы автоматического регулирования частоты не рассмотрен вопрос применения управляемого электрокинетического накопителя энергии, эффективность применения которого могла быть высокой.

Вопросы по диссертационной работе:

1. На сколько критично воздействие кратковременного отклонения частоты на работу генераторных агрегатов и технологического оборудования без использования СНЭЭ?

2. Сравнивался ли ущерб, надежность и производительность оборудования с СНЭЭ и без неё?

3. В каких случаях это является экономически оправданным, а в каких проще увеличить установленную мощность генераторных агрегатов?

Приведенные замечания не снижают научную ценность и практическую значимость представленной к защите диссертации.

Общее заключение по диссертации.

Диссертация «Разработка способов и алгоритмов управления накопителями энергии для стабилизации частоты в автономных энергосистемах» соискателя **Нестеренко Глеба Борисовича** выполнена на высоком уровне, является самостоятельным, целостным исследованием, имеет внутреннее единство и является завершенной научно-квалификационной работой. Проведенные автором исследования содержат решение актуальный

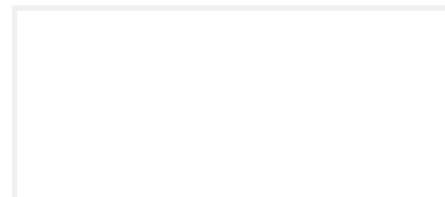
задачи создания алгоритмов управления системами накопления электрической энергии для стабилизации частоты в автономных энергосистемах, что имеет большое значение для развития российской электроэнергетики, особенно автономных энергосистем.

Диссертация отвечает требованиям 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. №842 (ред. от 18.03.2023), а её автор, **Нестеренко Глеб Борисович**, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.3 – Электроэнергетика.

Официальный оппонент,

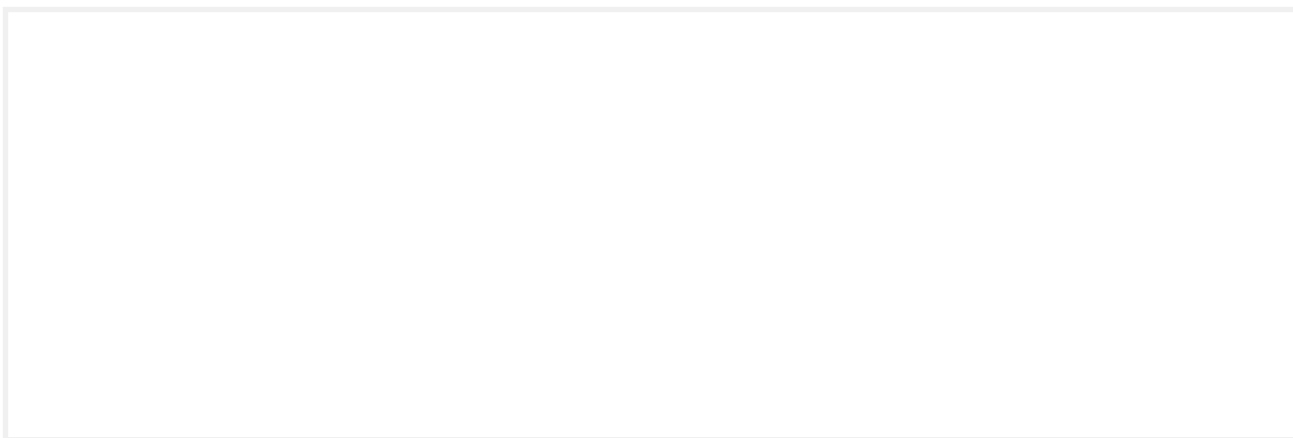
Доцент кафедры систем автоматизированного проектирования, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики»

Смоленцев
Николай
Иванович



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики». Адрес: 630102, Сибирский федеральный округ, Новосибирская область, г. Новосибирск, ул. Кирова, д. 86. Тел: +7 383 269-82-28. E-mail: uralcm@mail.ru.

Дата: 16.09.2023г.



Отзыв коллег 18.09.2023г. от Смоленцев Н.И.
С отзывом ознакомлен 18.09.2023 г. Глеб Нестеренко Г.Б.