

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, доцента Сулова Константина Витальевича 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 определяется, прежде всего, тем, что в России имеется большое количество изолированных систем электроснабжения с автономными генераторными установками, обеспечивающих потребителей, расположенных в основном в удалённых районах Сибири и Дальнего Востока. Как правило, такие районы характеризуются дорогостоящей логистикой при снабжении материалами, оборудованием, топливом. Доставка топлива производится в основном в рамках Северного завоза. В таких условиях себестоимость электроэнергии существенно 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. Частые и глубокие изменения потребляемой мощности таких электроприёмников даже при выполнении нормальных технологических операций приводят к значительным, резким изменениям режимных параметров. Такую нагрузку принято относить к резкопеременной. Резкие сбросы и набросы нагрузки величиной более 20–30 % от номинальной мощности электростанции приводят к ударным (с высокой скоростью) изменениям частоты, опасным для генераторных агрегатов и двигательной нагрузки, существенно сокращающим срок службы и надёжность технологического оборудования.

Основу современной автономной энергетики составляют дизель-генераторные установки (ДГУ). В то же время автономные электростанции для нефте- и газодобывающих предприятий в последние десятилетия активно оснащаются газопоршневыми (ГПУ) и газотурбинными (ГТУ) установками, работающими на попутном или природном газе. 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 кратковременных отклонениях частоты более чем на 1,0–1,5 Гц происходит отключение ГПУ 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. 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.

Перечисленные факторы определяют актуальность темы и содержание диссертации в теоретическом и практическом направлениях.

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 были поставлены и решены следующие **задачи**:

- выполнен анализ результатов мониторинга режимных параметров электростанции в автономной энергосистеме нефтедобывающего предприятия с резкопеременной нагрузкой;
- обоснованы и сформулированы требования к системе автоматического регулирования частоты в автономной энергосистеме со СНЭЭ;
- разработана математическая модель автономной энергосистемы;
- разработаны алгоритмы управления СНЭЭ для регулирования частоты;
- разработан алгоритм поддержания уровня заряда СНЭЭ без прерывания выполнения основной функции;
- разработаны алгоритмы управления АГЭУ для регулирования частоты;
- выполнено исследование эффективности 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;

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 заключается в следующем:

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 работы:

1. Разработанные алгоритмы управления кардинальным образом уменьшают отклонения частоты в автономных энергосистемах при помощи СНЭЭ, могут быть использованы при проектировании 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;

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

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

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 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 ряде всероссийских и международных конференций, симпозиумов и научных семинаров.

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. Стоит отметить, 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.

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.

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).

Четвертая глава посвящена разработке алгоритмов управления для стабилизации частоты в энергосистеме с автономной гибридной энергоустановкой, включающей в свой состав ДГУ, СНЭЭ и солнечную электростанцию (СЭС). На математической модели в среде MATLAB/Simulink выполнен анализ эффективности разработанной системы автоматического регулирования частоты при работе с различными нагрузочными диаграммами, в том числе полученными на реальном энергообъекте.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

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

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

Автореферат диссертации достаточно полно и точно отражает ее содержание.

Замечания по диссертационной работе:

1. Не совсем понятен рис. 1.1 “Обобщенные статические характеристики потребления активной и реактивной мощности по частоте”. Нет пояснений, оси не подписаны. Но, как я понимаю, данный рисунок имеет важное значение при обосновании актуальности исследования.

2. Необходимы дополнительные пояснения к рисунку 1.8 по децентрализованному электроснабжению. Что именно автор понимает под терминами централизованное и децентрализованное электроснабжением. Согласно карты, представленной на рисунке, например, электроснабжение части районов Якутии зоны централизованного электроснабжения изображены в виде небольших островов, в то же время, в европейской части России имеется много районов децентрализованного электроснабжения (согласно карты, представленной в работе).

3. В 1 главе имеется информация о снижении инерции энергосистемы при использовании возобновляемых источников энергии. Очень важный момент. Описан недостаточно подробно.

4. Рис.1.17. Непонятен используемый термин “снижение счета с ВИЭ”. Необходимо пояснение данного термина.

5. Автором приводится информация о замене ДГУ на ГПУ и при этом указывается необходимость применения накопителей электроэнергии с определенными параметрами. Непонятно откуда взяты конкретные цифровые значения параметров накопителя при осуществлении данной замены (параграф 2.1, стр. 65).

6. Автором при описании алгоритма на основе управления по возмущению (рис.3.10) вводится искусственная зона нечувствительности с СНЭЭ. Автором утверждается, что данная зона позволяет сохранить ресурс. Как я понимаю, при малых изменениях не происходит работа СНЭЭ. Необходимы пояснения: Какие граничные условия, насколько должен измениться сигнал, чтобы начал работать накопитель?

7. Необходимы пояснения, что автор понимает под критическими параметрами СНЭЭ (рис.3.3)?

8. Каким образом в работе учитывается деградация СНЭЭ и как это влияет на рабочий диапазон накопителей?

9. В главе, посвящённой выбору параметров алгоритма, для разных алгоритмов автор выбирает их параметры. В работе приведено описание методики выбора, но не представлено конкретное математическое описание, в частности шаг изменения при выборе параметров.

10. В главе 4 при моделировании используется нечёткий контроллер. Т.к., исходя из модели, он играет ключевую роль в системе управления, необходимы более подробные пояснения принципа и алгоритма его работы и непосредственно математическое описание. Хотя в дальнейшем, в этой главе представлены результаты расчетов в виде графиков.

11. ГОСТ 32144-2013 допускает достаточно большой диапазон отклонения частоты в изолированных системах. “Отклонение частоты в изолированных системах электроснабжения с автономными генераторными установками, не подключенных к синхронизированным системам передачи электрической энергии, не должно превышать ± 1 Гц в течение 95% времени интервала в одну неделю и ± 5 Гц в течение 100% времени интервала в одну неделю”. Из работы не совсем ясно, какова экономическая целесообразность использования данной методики? И какие имеются альтернативные способы

поддержания частоты и насколько они экономически и технически более или менее целесообразны?

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

Общее заключение по диссертации.

В целом, диссертация «Разработка способов и алгоритмов управления накопителями энергии для стабилизации частоты в автономных энергосистемах» соискателя **Нестеренко Глеба Борисовича** выполнена на достаточно высоком уровне, является самостоятельным, целостным исследованием, имеет внутреннее единство и является завершённой научно-квалификационной работой. Проведенные автором исследования содержат решение актуальной задачи создания алгоритмов управления накопителями энергии для стабилизации частоты в автономных энергосистемах для повышения качества электроснабжения потребителей, что имеет большое значение для развития 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,
Профессор кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский университет «МЭИ»

Суслов
Константин
Витальевич

Федеральное государственное бюджетное
высшее образование «Национальный исследовательский университет «МЭИ». Адрес: 111250, г. Москва, ул. 362-72-51. E-mail: dr.souslov@yandex.ru.

Дата 11.09.2023

Взвешивание 19.09.2023г. Проф. Суслов К.В.
С отзывом ознакомлен 19.09.2023г. Глеб Нестеренко Г.Б.