


## УТВЕРЖДАЮ

уке и коммерциализации  
ЭУ»  
Ившин И.В.  
 2023 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» на диссертационную работу Нестеренко Глеба Борисовича «Разработка способов и алгоритмов управления накопителями энергии для стабилизации частоты в автономных энергосистемах», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.4.3 – Электроэнергетика (технические науки).

#### Актуальность темы

Системы накопления электрической энергии (СНЭЭ) являются важным элементом зарубежных энергосистем, а в последние годы всё шире применяются и в России. С учётом невысокой доли возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в структуре установленной мощности и относительно невысокой стоимости электроэнергии в ЕЭС России, в настоящее время применение СНЭЭ наиболее перспективно в автономных энергосистемах нашей страны. Актуальность темы диссертации обусловлена целесообразностью привлечения СНЭЭ к регулированию частоты в автономных энергосистемах, особенно имеющих резкопеременную нагрузку. Это необходимо для удовлетворения индивидуальных требований потребителей, имеющих чувствительную высокотехнологичную нагрузку, а также для повышения эффективности и расширения области применения электростанций на основе газопоршневых генераторных установок (ГПУ), чувствительных к сбросам и набросам мощности, и автономных гибридных энергоустановок (АГЭУ), имеющих в своём составе дизель-генераторные установки (ДГУ) и ВИЭ со стохастическим характером генерации. Целью диссертации Нестеренко Г. Б. является исследование и разработка способов и алгоритмов управления, позволяющих использовать систему накопления электрической энергии для стабилизации частоты в автономной энергосистеме.

Тема диссертационной работы актуальна, отвечает современным потребностям электроэнергетической отрасли, представляет научный и практический интерес.

#### Общая характеристика работы

Диссертационная работа Нестеренко Г. Б. состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений, списка литературы, включающего 105 наименований, и 3 приложений. Общий объем работы составляет 175 страниц,



включает 98 рисунков и 11 таблиц.

По теме диссертации опубликованы 32 печатные научные работы, в том числе 5 статей в изданиях из перечня ВАК, 11 статей в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science, и 16 статей в прочих изданиях.

**Во введении** представлена общая характеристика работы, обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, 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 и применения СНЭЭ для её решения. Более чем в половине проектов СНЭЭ в мире предусмотрено участие в регулировании частоты, однако в России СНЭЭ пока не привлекаются к выполнению этой задачи.

**Вторая** глава посвящена анализу результатов мониторинга режимных параметров автономной энергосистемы с дизельной электростанцией, основным потребителем которой является буровая установка, и формулированию требований к системе автоматического регулирования частоты.

Выявлено, что график нагрузки имеет ярко выраженный резкопеременный характер, допустимый для ДГУ, но неприемлемый для экономически более выгодных ГПУ. Отклонения частоты не превышают предельно допустимое значение по ГОСТ 32144, но имеют значительную амплитуду и ударный характер, опасный для чувствительных потребителей и генераторных установок, например, ГПУ.

Для обеспечения эффективной работы электроприёмников и генераторных установок, чувствительных к изменениям частоты, предлагается ограничить максимальное отклонение частоты значением  $\pm 0,2$  Гц, то есть обеспечить в автономных энергосистемах такие же допустимые отклонения частоты, как в ЕЭС России.

**Третья** глава посвящена разработке алгоритмов управления СНЭЭ для стабилизации частоты в автономной энергосистеме с электростанцией на основе традиционных генераторов. Апробация алгоритмов управления выполнялась в среде MATLAB/Simulink на разработанной математической модели автономной энергосистемы, включающей ДГУ, СНЭЭ и нагрузку.

Для минимизации максимального отклонения частоты и ликвидации её ударных изменений, происходящих с высокой скоростью, предложен новый способ регулирования частоты с помощью СНЭЭ, совмещающий управление по возмущению (изменению нагрузки) и по отклонению частоты.

В случае использования разнотипных аккумулирующих элементов, например, литий-ионного и суперконденсаторного накопителей в составе гибридной СНЭЭ, для распределения управляющих воздействий между ними разработан алгоритм управления СНЭЭ с динамическим изменением коэффициентов усиления, которые изменяются таким образом, что в начале возмущения в регулировании в большей степени участвует суперконденсатор,



имеющий преимущество по доступным циклам заряда-разряда, а затем в работу постепенно включается литий-ионный аккумулятор с большей энергоёмкостью.

Для обеспечения высокой готовности СНЭЭ к участию в регулировании частоты в каждый момент времени, предложен способ и разработан алгоритм поддержания уровня заряда накопителя энергии за счёт преднамеренного усиления или ослабления управляющего воздействия в зависимости от текущего уровня заряда.

**Четвертая** глава посвящена разработке алгоритмов управления для стабилизации частоты в энергосистеме с автономной гибридной энергоустановкой (АГЭУ), имеющей в составе ДГУ, СНЭЭ и солнечную электростанцию (СЭС). Модель автономной энергосистемы в MATLAB/Simulink, используемая для апробации алгоритмов, 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 СЭС предусмотрено два типа участия в регулировании: только для ограничения повышения частоты и «в обе стороны». С целью определения параметров регуляторов частоты для каждого источника энергии выбрана минимизируемая целевая функция. Перераспределение долей участия в регулировании между СНЭЭ и СЭС выполняется нечётким контроллером, который также определяет тип участия СЭС в регулировании.

Выполнен анализ эффективности системы автоматического регулирования частоты на нагрузочных диаграммах по ГОСТ МЭК 60034-1 и на резкопеременном графике энергопотребления реального энергообъекта. Выявлено, что, даже не вводя дополнительных средств регулирования, можно значительно снизить отклонения частоты за счёт оптимизации регулятора ДГУ. Однако привлечение СНЭЭ и СЭС к регулированию улучшает показатели ещё на порядок. Возможность изменения параметров регулятора ДГУ есть не всегда, но даже без этого при наличии СЭС и СНЭЭ с оптимизированными регуляторами отклонение частоты не превышает 0,2 Гц.

**В заключении** представлены обобщающие выводы по диссертационной работе.

#### **Соответствие автореферата и диссертации**

Автореферат в объеме 24 страниц полностью соответствует материалам, изложенным в диссертации, содержит ее основные положения и выводы.

#### **Значимость результатов, полученных автором диссертации**

##### Теоретическая значимость результатов работы

1. Разработанные алгоритмы управления являются основой для исследования эффективности их работы в аварийных режимах, влияния параметров СНЭЭ на качество электрической энергии, разработки подходов к определению оптимального состава и параметров источников и накопителей энергии, разработки способов управления накопителями энергии в ЕЭС России;



2. Разработанные алгоритмы управления обладают потенциалом для дальнейшего совершенствования в области учёта особенностей различных источников энергии и электроприёмников, в частности разработки систем управления АГЭУ различных типов, со СНЭЭ на основе различных накопителей энергии и др.

#### Практическая значимость результатов работы

1. Разработанные алгоритмы управления значительно уменьшают отклонения частоты в автономных энергосистемах при помощи СНЭЭ и дают возможность применять ВИЭ и генераторные установки, чувствительные к 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).

#### **Обоснованность и достоверность научных выводов, положений, рекомендаций**

Научные выводы и положения диссертации основаны на корректном применении теорий имитационного моделирования, обработки сигналов, мгновенной мощности, автоматического управления, оптимизации, нечёткой логики, а также использованием модели автономной энергосистемы, точность которой подтверждена сопоставлением результатов вычислительных и натуральных экспериментов. Кроме того, при формулировании требований к системе автоматического регулирования и при исследовании её эффективности использованы графики нагрузки реальных промышленных объектов.

#### **Методология и методы исследования**

Использовались теоретические методы по обработке сигналов, автоматическому управлению, нечеткой логике, математическому моделированию электротехнических объектов. Имитационное моделирование выполнялось в среде *Matlab/Simulink*. Для подтверждения достоверности теоретических результатов был проведен натурный эксперимент.



## **Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов, приведённых в диссертации**

Результаты диссертационной работы могут быть использованы в автономных системах распределенной генерации, изолированных от централизованного электроснабжения. Внедрение разработанных алгоритмов управления СНЭЭ, работающих совместно с ГПУ, повысит устойчивость нагрузки при кратковременных возмущениях режима.

### **Новизна полученных научных результатов**

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.

### **Замечания по диссертации**

По диссертации имеются следующие вопросы и замечания:

1. Соискатель пишет, что наброс нагрузки порядка 70% приемлем для ДГУ. Он не учитывает, что по ТУ 27.11.31-001-23041585-2018 при набросе 100% нагрузки допускается снижение частоты на 15%, а напряжения на 25% (класс G1). В совокупности это может привести к потере устойчивости АД, что обуславливает эффективность применения СНЭЭ и в этих случаях.

2. Цифровая обработка реального сигнала на предмет динамического контроля частоты в условиях его зашумленности высшими гармониками требует применения специальных методов. Соискатель не описывает в диссертации, как решается это вопрос в системе регулирования накопителя энергии.

3. Также ввод дифференцирующего звена предполагает предварительную «очистку» сигнала от импульсных помех. В имитационной модели эта проблема не проявляется. Как соотносятся между собой сигналы в



модели и сигналы в натуральных экспериментах?

4. В диссертации принято, что коэффициенты участия СНЭЭ и СЭС в сумме равны 1, а ДГУ всегда участвует в регулировании. Т.е. распределение участия зависит от текущего значения вырабатываемой мощности ДГУ. Каким критерием при этом определяется адаптивный запас мощности СНЭЭ, т.к. он также влияет на значение коэффициента участия СНЭЭ? И насколько эффективно при этом введение опции «краткосрочный прогноз нагрузки»?

5. В диссертации было бы целесообразно рассмотреть режим работы СНЭЭ в условиях экономии топлива ДГУ, что актуально при их использовании на удаленных территориях.

Приведённые замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы. При этом замечания следует рассматривать как рекомендации автору для дальнейшей работы.

### **Общее заключение по диссертации**

Диссертационная работа Нестеренко Глеба Борисовича является самостоятельной, законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены результаты исследований, имеющие существенное значение для развития применения систем накопления электрической энергии в автономных энергосистемах, повышения эффективности и расширения области применения генераторных установок, чувствительных резким изменениям нагрузки, и автономных гибридных энергоустановок на основе ВИЭ. Диссертация обладает внутренним единством, написана автором самостоятельно, содержит новые научные результаты и положения, представленные к защите. В диссертации имеются сведения о практической полезности результатов и научных выводов. Основные технические решения, научные результаты и выводы обстоятельно аргументированы и подтверждены практическим внедрением.

Диссертационное исследование Нестеренко Г. Б. соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней», утверждённым постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г., № 842. В соответствии с п. 9 Положения, диссертационное исследование является завершённой научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические разработки в области релейной защиты и автоматики электроэнергетических систем, состоящие в распознавании поврежденного участка сети и определения его координаты, имеющие существенное значение для развития страны.

Диссертационная работа соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 г. (ред. от 18.03.2023), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а также паспорту научной специальности по защищаемой специальности 2.4.3 – Электроэнергетика (технические науки), а её автор Нестеренко Глеб Борисович заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.4.3 –

Электроэнергетика (технические науки).

Отзыв на диссертацию Нестеренко Г. Б. «Разработка способов и алгоритмов управления накопителями энергии для стабилизации частоты в автономных энергосистемах» составлен доктором технических наук, профессором Федотовым Александром Ивановичем, обсужден на заседании кафедры «Электрические станции» им. В. К. Шибанова в составе 17 человек, из них 3 докторов и 10 кандидатов наук, и одобрен единогласно, протокол № 9/23 от «06» сентября 2023 г.

Заведующий кафедрой  
«Электрические станции»  
им. В.К. Шибанова  
к.т.н, доц.

С. М. Маргулис

Ученый секретарь к.т.н., доц.,

Е. А. Федотов

**Сведения о ведущей организации:**

Полное и сокращенное наименование организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет» (ФГБОУ ВО «КГЭУ»)

Место нахождения: 420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, д. 51

Телефон: (843) 519-40-02

Адрес электронной почты: kgeu@kgeu.ru

Адрес сайта организации: www.kgeu.ru

**Сведения о лице, утвердившем отзыв ведущей организации:**

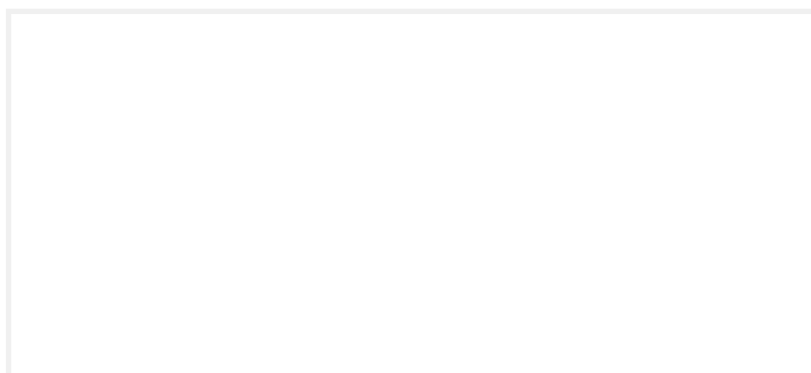
ФИО: Ившин Игорь Владимирович

Ученая степень, ученое звание: доктор технических наук, профессор

Должность: проректор по науке и коммерциализации ФГБОУ ВО «КГЭУ»

Телефон: (843) 519-43-72

Адрес электронной почты: inbin.iv@kgeu.ru



*Отзыв получен 13.09.2023г. Проф. / Овчинцев А.А. /  
С отзывом ознакомлен 15.09.2023г. Нест Нестеренко Г.Б.*