



МАТЕРИАЛЫ
 XI МЕЖДУНАРОДНОЙ
 НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
**ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА
 ГЛАЗАМИ МОЛОДЕЖИ-2020**
ТОМ I

100 лет ГОЭЛРО
*Мечта, воплощенная
 в плане*

Задачи электрификации

1. Сеть ТЭЦ
2. Промышленные предприятия. Мобильные электростанции.
3. Кустовые электростанции.
4. Каналы = с. в. в. + электростанция.
5. Механизация сельского хозяйства: электрификация и колхозы.
6. Механизация животноводства.
7. Каналы электростанций.



15-17 СЕНТЯБРЯ

**СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ
 ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГАОУ ВО «СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

АО «СИСТЕМНЫЙ ОПЕРАТОР ЕДИНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ»

РОССЕТИ ФСК ЕЭС (ПАО «ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЕТЕВАЯ КОМПАНИЯ ЕДИНОЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ»)

РОССИЙСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ КОМИТЕТ МЕЖДУНАРОДНОГО СОВЕТА
ПО БОЛЬШИМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СИСТЕМАМ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ
(РНК СИГРЭ)

БЛАГОТВОРИТЕЛЬНЫЙ ФОНД «НАДЕЖНАЯ СМЕНА»

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА ГЛАЗАМИ МОЛОДЕЖИ – 2020



Материалы
XI Международной научно-технической конференции
15 – 17 сентября 2020 года

В двух томах

Том I

Ставрополь
2020

Электроэнергетика глазами молодежи: материалы XI Международной научно-технической конференции, 15 – 17 сентября 2020, Ставрополь. – В 2 т. Т 1. – Ставрополь, Северо-Кавказский федеральный университет. – 347 с.

Опубликованы материалы XI Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» по научным направлениям «Управление электроэнергетическими режимами энергосистем», «Режимы работы и оборудование электрических сетей и систем», «Релейная защита и автоматика, энергосистем»: планирование электроэнергетических режимов; моделирование электроэнергетических систем для задач планирования, оперативно-диспетчерского и автоматического управления электроэнергетическим режимом энергосистемы; системные задачи для подготовки диспетчеров, организации проведения противоаварийных тренировок; высоковольтные линии электропередачи, электрические провода и кабели; режимы работы тепловых электростанций, гидроэлектростанций и атомных электростанций; силовые и измерительные трансформаторы; распределительные устройства станций и подстанций, коммутационное оборудование; устройства регулирования параметров электрического режима энергосистем; диагностирование электротехнического оборудования, релейная защита и сетевая автоматика, режимная и противоаварийная автоматика, концептуальные вопросы развития технологии РЗА энергосистем будущего, кибербезопасность - драйвер или тормоз развития РЗА, вопросы развития и опыт применения технологии синхронизированных векторных измерений (СВИ), системы мониторинга (параметров электроэнергетического режима, функционирования РЗА, состояния оборудования), запасов устойчивости (СМЗУ), системных регуляторов (СМСР) и т.д., технические решения по РЗА цифровой подстанции (ЦПС), регистрация аварийных событий и процессов (РАС, СМПР, ОМП), эксплуатация и техническое обслуживание современных РЗА.

Предназначен для научных работников, аспирантов и специалистов, работающих в сфере энергетики, а также для студентов вузов энергетического профиля.

Рецензенты: заместитель главного диспетчера по режиму Филиала АО «СО ЕЭС» Северокавказское РДУ Р.Ш. Альжанов, главный специалист Службы релейной защиты и автоматики Филиала АО «СО ЕЭС» ОДУ Юга В.В. Васильев, заместитель начальника Службы электрических режимов Филиала АО «СО ЕЭС» ОДУ Северо-Запада, к.т.н. В.В. Вессарт, доцент кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы и электроснабжение» ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», к.э.н. А.А. Гринь, доцент кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы и электроснабжение» ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», к.т.н. А.И. Гринь, главный эксперт отдела организации технического обслуживания и ремонта подстанций Департамента подстанций ПАО «ФСК ЕЭС» А.А. Гук, доцент кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы и электроснабжение» ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», к.ф.-м.н. М.И. Данилов, доцент кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы и электроснабжение» ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», к.ф.-м.н. М.С. Демин, советник директора Группы советников АО «СО ЕЭС», д.т.н. П.М. Ерохин, старший преподаватель кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы и электроснабжение» ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» П.А. Звада, Главный эксперт отдела релейной защиты и автоматики Департамента релейной защиты, метрологии и автоматизированных систем управления технологическими процессами ПАО «ФСК ЕЭС» Н.Г. Ключикин, профессор кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы и электроснабжение» ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», д.т.н. В.М. Кожевников, директор инженерного института, заведующий кафедрой «Автоматизированные электроэнергетические системы и электроснабжение» ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», д.т.н. Ю.Г. Кононов, старший преподаватель кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы и электроснабжение» ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет» Н.Н. Кононова, главный эксперт отдела организации технического обслуживания и ремонта подстанций Департамента подстанций ПАО «ФСК ЕЭС» А.В. Константинов, главный эксперт - руководитель группы организации технического обслуживания и ремонта кабельных линий Департамента воздушных линий ПАО «ФСК ЕЭС» С.В. Котов, ведущий эксперт отдела административных сервисов Филиала АО «СО ЕЭС» Центр сервисного обеспечения, к.т.н. Ю.А. Куликов, специалист I категории Службы релейной защиты и автоматики Филиала АО «СО ЕЭС» ОДУ Юга О.Е. Льгова, доцент кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы и электроснабжение» ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», к.т.н. В.А. Мамаев, заместитель начальника Департамента развития персонала АО «СО ЕЭС», к.т.н. А.В. Могин, главный научный сотрудник Отдела обеспечения НТС и НТИ АО «НТЦ ФСК ЕЭС» Ю.И. Моржин, доцент кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы и электроснабжение» ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», к.ф.-м.н. Т.Ф. Морозова, ведущий эксперт Департамента развития персонала АО «СО ЕЭС», к.т.н. И.А. Москвин, доцент кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы и электроснабжение» ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», к.т.н. В.М. Пейзель, заместитель начальника Службы тренажерной подготовки персонала Филиала АО «СО ЕЭС» ОДУ Юга А.А. Попов, главный научный сотрудник Отдела обеспечения НТС и НТИ АО «НТЦ ФСК ЕЭС» М.А. Рабинович, начальник отдела АСУ ТП и метрологии Департамента релейной защиты, метрологии и автоматизированных систем управления технологическими процессами ПАО «ФСК ЕЭС» М.И. Селезнев, главный специалист Службы электрических режимов Филиала АО «СО ЕЭС» ОДУ Юга К.А. Сидоров, начальник отдела организации технического обслуживания и ремонта подстанций Департамента подстанций ПАО «ФСК ЕЭС» А.А. Тулакин, доцент кафедры «Автоматизированные электроэнергетические системы и электроснабжение» ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», к.т.н. С.А. Филиппов, начальник Отдела обеспечения НТС и НТИ АО «НТЦ ФСК ЕЭС» А.Ю. Хрениников, ведущий специалист Службы управления персоналом Филиала АО «СО ЕЭС» ОДУ Юга Г.Д. Чивяга
Редакционная коллегия: Ю.Г. Кононов (отв. редактор), Д.С. Тучина, И.А. Москвин

Материалы публикуются в авторской редакции. Ответственность за их содержание возлагается на авторов.

- © Министерство энергетики Российской Федерации, 2020
- © Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, 2020
- © ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», 2020
- © АО «Системный оператор Единой энергетической системы», 2020
- © Россети ФСК ЕЭС (ПАО «ФСК ЕЭС»), 2020
- © Авторы, 2020

XI Международная научно-техническая конференция «Электроэнергетика глазами молодежи –2020»

Организаторы конференции



ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет»



АО «Системный оператор Единой энергетической системы»



Российский национальный комитет Международного Совета по большим электрическим системам высокого напряжения (РНК СИГРЭ)



Россети ФСК ЕЭС
(ПАО «ФСК ЕЭС»)



Благотворительный Фонд «Надёжная смена»

При поддержке



Министерство энергетики Российской Федерации



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

СИСТЕМЫ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ. ВОЗМОЖНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ И ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ

Нестеренко Г.Б.^{1,2}, Зырянов В.М.², Кирьянова Н.Г.², Коротков И.Ю.³, Рудюк И.Ф.²

¹ООО «Системы накопления энергии», Новосибирск, Россия,

²ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», Новосибирск, Россия,

³АО «РТСофт», Москва, Россия,

e-mail: nesterenkogb@yandex.ru

Аннотация

Состояние вопроса: Традиционная архитектура энергосистем с самого начала их формирования предопределялась одновременностью процессов производства и потребления электроэнергии. В последние десятилетия в составе и структуре энергосистем происходят изменения, связанные с распространением систем накопления электрической энергии (СНЭЭ), разделяющих во времени производство и потребление электроэнергии и способных повышать надёжность и эффективность энергосистем, повышать качество управления электрическими режимами, улучшать экономические показатели функционирования энергосистем на всех этапах производства, передачи и распределения электроэнергии. В России в основном реализуются лишь отдельные пилотные проекты в области СНЭЭ, ведётся поиск наиболее перспективных направлений их применения. В связи с этим целесообразным является проведение анализа зарубежного и имеющегося на данный момент российского опыта применения СНЭЭ.

Материалы и методы: Анализ опыта реализованных проектов в области СНЭЭ за рубежом и в России выполнен с использованием базы данных U.S. Department of Energy Global Energy Storage Database. Был выполнен анализ ряда научных статей и информации из открытых источников в сети Интернет. Также использовалась внутренняя информация технологической инжиниринговой компании ООО «Системы накопления энергии». С целью выявления проблем, ограничивающих развитие СНЭЭ в РФ, был проведён опрос специалистов ООО «Системы накопления энергии» и Новосибирского государственного технического университета, занимающихся реализацией проектов в области СНЭЭ.

Результаты: Проведён анализ реализованных проектов в области СНЭЭ. Выполнен обзор актуальных областей применения СНЭЭ в энергосистемах, в том числе с возобновляемыми источниками энергии и распределённой генерацией. Описаны подходы к решению множества актуальных задач выбора состава оборудования, организации структуры энергосистем, ведения режимов, обеспечения устойчивости и надёжности энергосистем с помощью СНЭЭ. Рассмотрен мировой и отечественный опыт применения различных технологий накопления электрической энергии. Сформулирован перечень основных факторов, ограничивающих развитие СНЭЭ в РФ.

Выводы: Большинство потенциальных проектов по применению СНЭЭ в России находится на «границе окупаемости». Каждый проект требует тщательного технико-экономического анализа. Наиболее эффективными оказываются те проекты, где в полной мере используется многофункциональность СНЭЭ. Наиболее перспективная область применения СНЭЭ в РФ в настоящее время – автономные энергосистемы. Применение СНЭЭ в составе автономных гибридных энергоустановок стало практически типовым решением. В перспективе таким решением может стать и применение СНЭЭ для обеспечения надёжной работы газопоршневых установок в условиях резкопеременной нагрузки.

Ключевые слова: система накопления электрической энергии, система накопления энергии, накопитель энергии, аккумулятор, возобновляемые источники энергии, области применения накопителей энергии, ЕЭС России, автономная энергосистема.

ELECTRICAL ENERGY STORAGE SYSTEMS. POTENTIAL APPLICATIONS AND DEVELOPMENT ISSUES

Nesterenko G.B.^{1,2}, Zyryanov V.M.², Kiryanova N.G.², Korotkov I.Yu.³, Rudiuk I.F.²

¹LLC «Energy Storage Systems», Novosibirsk, Russia,

²Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia,

³JSC «RTSoft», Moscow, Russia,

e-mail: nesterenkogb@yandex.ru

Abstract

Background: Since the beginning of formation traditional architecture of power systems was predetermined by the simultaneous processes of production and consumption of electricity. A composition and structure of power systems are change under the influence of spreading of electrical energy storage systems (EESS) in recent decades. The use of EESS makes it possible to separate the production and consumption of electricity in time, increases the reliability and efficiency of power systems, improves the quality

of control of electrical modes, improves the economic performance of power systems at all stages of production, transmission and distribution of electricity. Nowadays in Russia only individual experimental projects in the field of EESS are being implemented in general; the most promising areas of their application are being searched for. In this regard, it is advisable to analyze the foreign and currently available Russian experience of using EESS.

Materials and methods: The analysis of foreign and domestic experience of implementing projects with the use of EESS was carried out using the U.S. Department of Energy Global Energy Storage Database. A number of scientific articles and information from open sources from the Internet were analyzed. Internal information from the technological engineering company Energy Storage Systems LLC also was used. To identify the problems that are limiting the development of EESS in the Russian Federation, the survey of specialists of Energy Storage Systems LLC and the Novosibirsk State Technical University involved in the implementation of projects in the field of EESS was conducted.

Results: The analysis of the implemented projects with the use of EESS was carried out. An overview of the current areas of application of EESS in power systems has been performed, including systems with renewable energy sources and distributed generation. Approaches to solving a variety of urgent problems of choosing the composition of equipment, organizing the structure of power systems, maintaining modes, ensuring the stability and reliability of power systems using EESS are described. The world and domestic experience of using various technologies for accumulating electric energy is analyzed. A list of the main factors that are limiting the development of EESS in the Russian Federation is formulated.

Conclusions: Most of the potential projects for the application of EESS in Russia are on the payback line. Each project requires a thorough technical and economic analysis. A multifunctional use of EESS increases project efficiency. The most promising area of application of EESS in the Russian Federation at the present time is off-grid power systems. Using EESS as part of autonomous hybrid power plants has become almost a typical solution. In the future, using EESS to ensure the reliable operation of gas engine generators that are operating according to an abruptly variable load may also become a typical solution.

Key words: electrical energy storage system, energy storage system, energy storage device, battery, renewable energy sources, energy storage devices's application areas, Unified Power System of Russia, off-grid power system.

I. ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия в составе и структуре энергосистем происходят существенные качественные изменения. В первую очередь это связано со значительной и неуклонно возрастающей долей генерации с использованием возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и развитием распределённой генерации. Учитывая стохастический характер генерации ВИЭ, а также её зависимость от погодных условий, для гарантированного обеспечения баланса мощности необходим соответствующий объём резервной мощности, который в настоящее время реализуется в основном за счёт традиционной генерации. Очевидно, что такой способ сохранения баланса имеет свои ограничения: технические и экономические. Проблема интеграции ВИЭ в состав традиционной энергосистемы при таком подходе остаётся решённой не до конца. Качественно другим, новым подходом является внедрение систем накопления электрической энергии (СНЭЭ), которые позволяют решить проблему интеграции ВИЭ в энергосистему в полной мере. В настоящее время использование СНЭЭ – одно из ключевых направлений развития электроэнергетики. Возможность разделять во времени процессы производства и потребления электроэнергии, которая появляется при применении СНЭЭ, является предпосылкой к революционным преобразованиям в структуре и организации функционирования энергосистем, повышению их надёжности и эффективности. СНЭЭ открывает новые возможности для повышения качества управления электрическими режимами и улучшения экономических показателей функционирования электроэнергетических систем на всех этапах производства, передачи и распределения электроэнергии [1–3]. Наиболее эффективные из большого разнообразия типов СНЭЭ в последние десятилетия вышли на уровень практического применения в электроэнергетике.

II. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СНЭЭ

СНЭЭ является многофункциональным устройством способным одновременно выполнять функции управления активной и реактивной мощностью, активного фильтра высших гармоник, компенсации несимметрии напряжения. Учитывая высокую стоимость СНЭЭ, целесообразно совмещать в одном устройстве одновременное выполнение разных функций. Ниже обсуждаются некоторые из наиболее актуальных задач, которые могут быть решены и решаются с помощью СНЭЭ.

A. Повышение эффективности электростанций на основе ВИЭ

Располагаемая мощность электростанций на основе ВИЭ, прежде всего, ветровых и солнечных имеет стохастическую природу. Стохастический характер имеет и график нагрузки потребителей. Необходимость обеспечивать баланс активной мощности приводит к недоиспользованию располагаемой мощности станции при её избытке или к ограничению нагрузки при её дефиците. Накопители энергии позволяют согласовывать графики генерации и нагрузки, обеспечивая полную загрузку электростанции по фактическому значению потока ветровой или солнечной энергии. Также СНЭЭ позволяют решать задачу управления энергосистемой при значительной доле ветровой или солнечной генерации.

B. Автоматическое регулирование частоты и перетоков активной мощности

Избыток или дефицит активной мощности приводит к изменению частоты в энергосистеме, поддержание которой в нормируемых пределах при наличии резервов регулирования осуществляется автоматическими регуляторами частоты. Накопители энергии могут эффективно применяться в качестве вращающегося резерва, а также первичного и вторичного резерва регулирования частоты [4].

Благодаря быстрдействию, накопители способны одновременно выполнять функции как первичного, так и вторичного резерва активной мощности. Они могут устранять небалансы активной мощности в темпе переходных электромеханических процессов (при времени отклика около 5 мс), что коренным образом улучшит качество регулирования частоты при возникновении значительных небалансов. Распределение СНЭЭ по узлам энергосистемы позволит снизить аварийные перетоки при небалансах активной мощности. В нормальном режиме это приведет к увеличению максимально допустимых перетоков в контролируемых сечениях.

С. Выравнивание суточных графиков нагрузки

СНЭЭ с достаточной энергоёмкостью и мощностью способна выравнивать график нагрузки, накапливая электроэнергию в период ночного минимума при её минимальной стоимости и возвращая в периоды максимумов с максимальной стоимостью. Выравнивание суточного графика ведет к уменьшению потребности энергосистемы в пиковой мощности и снижению перетоков мощности по линиям электропередачи в периоды максимумов.

Д. Предотвращение снижения напряжения и лавины напряжения

Изменение режима работы энергосистемы, нормальные технологические коммутации её элементов, аварийные события приводят к изменениям уровней напряжения в электрической сети. Установленные в узлах нагрузки СНЭЭ способны поддерживать требуемый уровень напряжения, а также регулировать его по любому заданному закону в темпе переходных процессов. Это позволяет избежать отключения нагрузки, ведет к снижению перетоков реактивной мощности по линиям электропередачи, а также к снижению вероятности развития лавины напряжения.

Е. Увеличение пропускной способности (по энергии) электропередачи

Отдельные крупные потребители электроэнергии, а также промышленные районы, удалённые от объединённой энергосистемы зачастую получают электроэнергию по линиям электропередачи, которые можно классифицировать как слабые связи. Путем установки СНЭЭ на приёмном конце электропередачи можно добиться перераспределения передаваемой энергии во времени таким образом, чтобы сгладить график загрузки электропередачи и снизить пиковое значение мощности в центре питания. Таким образом становится возможным передавать большее количество энергии, избегая превышения максимально допустимого значения мощности электропередачи. Это позволит отсрочить строительство дополнительных линий.

Ф. Повышение надёжности электроснабжения потребителей особой группы

Потребители особой группы – это те потребители, перерыв электроснабжения которых даже на время работы автоматики (АВР) может привести к нарушению технологического процесса и значительному ущербу. Потребители особой группы имеют резервный источник питания – аварийные дизель-генераторные установки (ДГУ). Время, необходимое для пуска и подключения ДГУ к системе электроснабжения, достаточно велико. За это

время выбег электродвигателей возрастает настолько, что в процессе самозапуска асинхронных двигателей возникают недопустимо большие токи, а устойчивость синхронной работы синхронных двигателей может быть нарушена. Использование в составе системы электроснабжения СНЭЭ, которая способна обеспечить питание потребителей до момента включения аварийного генератора, приведет к существенному повышению надёжности электроснабжения потребителей особой группы.

Г. Подавление низкочастотных колебаний режимных параметров

В энергообъединениях существует опасность низкочастотных колебаний (НЧК) параметров режима в диапазоне частот 0,1–2,0 Гц [5]. При малых демпфирующих свойствах энергосистемы может проявиться тенденция к «развитию» колебательного процесса, что ведет к нарушению устойчивости и каскадному развитию аварии. Многофункциональность СНЭЭ и её высокое быстрдействие позволяют подавлять НЧК при первых признаках их появления [5].

Н. Оптимизация состава оборудования и режимов работы автономных электростанций

Парк оборудования большинства автономных электростанций включает в себя дизельные, газопоршневые и газотурбинные генераторные агрегаты. Количество этих агрегатов на каждой станции – несколько единиц. Часто их коэффициент использования установленной мощности имеет низкие значения (КИУМ 25–35 %), что является причиной повышенного расхода топлива. Использование СНЭЭ в составе автономной электростанции дает возможность снизить установленную мощность генераторных агрегатов (вплоть до среднего значения графика нагрузки), обеспечить высокий КИУМ и значительно сократить расход топлива при гарантированном покрытии максимума нагрузки.

И. Сглаживание резкопеременной нагрузки

Потребители большой мощности с резкопеременным графиком нагрузки негативно влияют на работу энергосистемы. Колебания мощности, передаваемой по питающим линиям электропередачи, приводят к возрастанию потерь активной мощности, понижению уровня статической и динамической устойчивости энергосистемы, возрастанию вероятности развития низкочастотных колебаний режимных параметров. Установка СНЭЭ в узле нагрузки дает возможность свести к минимуму нежелательные отклонения режимных параметров и поддерживать их в заданных пределах.

Ж. Повышение качества электроэнергии в узлах с резкопеременной нагрузкой

В узлах энергосистемы, от которых питается мощная резкопеременная нагрузка, приводящая к скачкообразным изменениям величины и фазы напряжения, искажению формы кривой напряжения, существует проблема обеспечения качества электроэнергии. При достаточности ресурсов, наличии адаптивной системы управления и приемлемом быстрдействии СНЭЭ способна обеспечивать основные показатели качества электроэнергии: поддерживать заданный уровень напряжения и частоты, подавлять высшие гармоники

К. Противоаварийное управление

Быстродействие и многофункциональность СНЭЭ дает возможность использовать их в качестве средства противоаварийного управления [4]. В случае возникновения аварийной ситуации и поступления сигнала от традиционной системы противоаварийной автоматики (ПА) СНЭЭ способна влиять на процессы в энергосистеме путем выдачи или потребления активной/реактивной мощности со временем отклика около 5 мс. Использование СНЭЭ делает систему ПА более эффективной и надёжной за счёт появления дополнительных возможностей по влиянию на режимные параметры.

Л. Повышение эффективности гибридных электростанций в автономных энергосистемах

На территориях, не входящих в состав Единой энергетической системы России, автономно работают несколько тысяч дизельных электростанций. На закупку и доставку топлива для них тратится до 40 % региональных бюджетов. Наличие достаточных объёмов возобновляемых ресурсов энергии делает выгодным строительство автономных гибридных энергоустановок (АГЭУ), в состав которых входят ветрогенераторы или солнечные установки, а также традиционные дизель-генераторные агрегаты. Использование СНЭЭ в составе АГЭУ позволит повысить их эффективность за счёт появления возможности оптимизировать потоки энергии. Также оснащение гибридных электростанций СНЭЭ позволяет хранить невостребованные объёмы энергии, полученные при избытке возобновляемой генерации.

М. Компенсация реактивной мощности и оптимизация её перетоков

Одна из четырёх основных функций СНЭЭ – управление реактивной мощностью. Таким образом, СНЭЭ способны заменить традиционные средства управления, компенсации реактивной мощности, регулирования напряжения в узлах электрической сети. Быстродействие СНЭЭ, а также их способность как потреблять, так и выдавать реактивную мощность дают возможность применять их не только для регулирования в нормальных режимах, но и для решения задач противоаварийного управления.

Н. Защита генераторных агрегатов от резких изменений нагрузки

Резкие изменения нагрузки большой амплитуды в автономных энергосистемах, а также энергосистемах, работающих в островном режиме, могут приводить к аварийным отключениям газопоршневых установок (ГПУ), которые являются самыми чувствительными к скачкам мощности генераторными агрегатами [6]. В то же время ГПУ по технико-экономическим характеристикам наиболее привлекательны для автономных энергосистем предприятий нефтегазового сектора, как правило, не имеющих связи с объединённой энергосистемой. СНЭЭ за счёт сглаживания фронтов импульсов нагрузки способны решить описанную задачу, предотвращая аварийное отключение ГПУ [7]. Причём для этого не требуется большая энергоёмкость накопителя энергии.

О. Демпфирование нерегулярных колебаний активной мощности

Нерегулярные колебания перетоков между частями энергообъединения появляются в результате несоответствия между генерацией и потреблением и имеют случайный характер. Чем выше амплитуда нерегулярных колебаний, тем ниже расчётный коэффициент запаса статической устойчивости. Снижение амплитуды нерегулярных колебаний при помощи СНЭЭ позволяет увеличить коэффициент запаса статической устойчивости, а следовательно, допустимый переток активной мощности по сечению.

III. МИРОВОЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СНЭЭ

Для анализа практического применения СНЭЭ в энергосистемах стран мира использована база данных U.S. Department of Energy Global Energy Storage Database [7] по состоянию на конец 2019 года, рассмотрены проекты мощностью более 50 кВА. Анализ СНЭЭ по типам накопителя энергии представлен в таблице I.

ТАБЛИЦА I. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ОСНОВНЫХ ТИПОВ СНЭЭ

Общий тип		ВАЭС	Водородные	Тепловые	Электрохимические	ГАЭС
Кол-во	ед	2	13	134	754	350
	%	0.2	1	10.7	60.2	27.9
Средняя мощность	МВт	2.7	1.6	24.4	4.4	523
	%	0.5	0.3	4.4	0.8	94
Средняя энергоёмкость	МВт·ч	8.7	16.8	173.4	11	19102
	%	0.1	0.1	0.8	0.1	98.9

На долю гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС) приходятся наибольшие суммарные значения мощности и энергоёмкости. Однако их обычно рассматривают обособленно от других СНЭЭ не только по причине большей мощности и энергоёмкости, но и в связи с тем, что ГАЭС являются традиционным решением и широко применяются в энергосистемах многих стран мира. Кроме того, ГАЭС уступают по мобильности и быстродействию современным электрохимическими СНЭЭ. В таблице II показано распределение электрохимических СНЭЭ с разными типами накопителей энергии по суммарной мощности и суммарной энергоёмкости, соответственно.

По мощности и энергоёмкости среди действующих проектов СНЭЭ лидируют ГАЭС, по количеству проектов – другие типы СНЭЭ, среди которых преобладают электрохимические (754 проекта – 60 % всех проектов, учитывая ГАЭС). Активное развитие технологий литий-ионных аккумуляторов способствует значительному снижению себестоимости СНЭЭ и росту их востребованности в электроэнергетике.

ТАБЛИЦА II. СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАЗНЫХ ТИПОВ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ СНЭЭ

Тип	Количество, ед.	Средняя мощность, МВт	Средняя энергоёмкость, МВт·ч
Гибрид: св.-кис. + суперконд.	8	1	0.6
Суперконденсаторные	27	1.3	0.1
Свинцово-кислотные	59	2.8	3.3
Металло-воздушные	6	3.3	51.5
На основе натрия	63	3.5	22.2
Проточные	73	4.4	16.9
Литий-ионные	488	4.7	10
На основе никеля	4	8.1	3.1

IV. ОТЕЧЕСТВЕННЫЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СНЭЭ

Бурный рост интереса к тематике СНЭЭ в отечественной научной среде начался в конце 1960-х годов, что соответствовало аналогичным процессам в мировом научно-техническом сообществе. Однако экономическая ситуация в стране в конце XX века не способствовала развитию этого направления энергетики. За последние десятилетия ряд наиболее эффективных технологий накопления энергии достиг уровня практического применения в электроэнергетике. Одновременно с этим значительно снизилась стоимость основных компонентов (аккумуляторов, силовых преобразователей), что, в свою очередь, повысило рентабельность проектов с применением СНЭЭ. Потенциально высокие экономические показатели резко увеличили интерес к тематике СНЭЭ, в том числе в России.

Согласно [8], в РФ реализовано всего 6 промышленных проектов СНЭЭ, в том числе три ГАЭС. В настоящее время в России эксплуатируются: Загорская ГАЭС-1, Кубанская ГАЭС и Зеленчукская ГЭС-ГАЭС. В октябре 2019 г. «РусГидро» сообщило о начале работ по выравниванию здания Загорской ГАЭС-2, во время строительства которой в 2013 г. произошла осадка здания ГАЭС. Три проекта СНЭЭ с электрохимическими накопителями: два накопителя на литий-ионных аккумуляторах (мощностью 1,5 МВт каждый) в Санкт-Петербурге и в Сочи, один - на цинк-бромных аккумуляторах (мощностью – 25 кВт) в Москве. Но в базе данных [8] отражена неполная информация о количестве реализованных проектов накопителей энергии в РФ. Актуальная информация представлена в таблице III.

ТАБЛИЦА III. РЕАЛИЗОВАННЫЕ ПРОЕКТЫ СНЭЭ В РФ (БЕЗ УЧЁТА ГАЭС)

№	Местоположение	Тип аккумулятора	Мощность, кВА/ Энергоёмкость, кВ·ч	Назначение
ЕЭС России				
1	г. Москва	Цинк-бромные	25/25	Снижение затрат на покупку электроэнергии
2	ПС Сколково, Московская обл.	Литий-никель-марганец-кобальтовые (NMC)	1200/1000	ИБП

№	Местоположение	Тип аккумулятора	Мощность, кВА/ Энергоёмкость, кВ·ч	Назначение
3	ПС Смирново, Московская обл.	NMC	1200/1000	ИБП
4	ПС Веселое, г. Сочи	NMC	600/500	ИБП
5	ПС Спортивная, г. Сочи	NMC	600/500	ИБП
6	ПС Псоу, г. Сочи	NMC	1500/2500	ИБП
7	ПС Волхов-Северная, г. Санкт-Петербург	NMC	1500/2500	ИБП
8	ПС Восход, г. Омск	NMC	1200/1000	ИБП
9	Зарядная станция для электромобилей, г. Рязань	Литий-железо-фосфатные (LFP)	22/100	Снижение пиковой мощности; снижение затрат на покупку электроэнергии; ИБП
13	Инженерный дом АО «РТСОфт», г. Москва	LFP	60/67.2	Снижение затрат на покупку электроэнергии
14	Самарская область, г. Жигулевск	LFP	200/210	Снижение затрат на покупку электроэнергии
15	Сеть 0,4 кВ мкр. Юго-Западный, г. Белгород	Литий-ионные	10/53	Повышение надёжности электроснабжения и качества электроэнергии
16	Бурзянская солнечная электростанция, Башкортостан	LFP	4000/8000	Сглаживание резких изменений мощности СЭС; ИБП
Автономные энергосистемы				
10	Забайкальский край, с. Менза	LFP	90/300	Оптимизация работы солнечно-дизельной электростанции
11	Республика Тыва, с. Мугур-Аксы	LFP	400/373	Оптимизация работы солнечно-дизельной электростанции
12	Республика Тыва, с. Кызыл-Хая	LFP	100/204	Оптимизация работы солнечно-дизельной электростанции

Кроме того, несколько проектов СНЭЭ в РФ находятся в процессе реализации. На Кош-Агачской СЭС, работающей в ЕЭС России (ОЭС Сибири), планируется установка СНЭЭ энергоёмкостью 584 кВт·ч. В Новосибирске завершены испытания СНЭЭ мощностью 1200 кВА энергоёмкостью 400 кВт·ч с алгоритмом сглаживания резких сбросов и набросов нагрузки для обеспечения надёжной работы газопоршневых установок в

энергоцентре нефтегазового месторождения [7]. В процессе производства находятся четыре СНЭЭ для автономных гибридных энергоустановок (солнечно-дизельных электростанций), расположенных на Чукотке (с. Канчалан, с. Снежное, с. Марково) и в Красноярском крае (п. Тура) суммарной мощностью 1500 кВА и энергоёмкостью 1212 кВт·ч.

V. ФАКТОРЫ, ОГРАНИЧИВАЮЩИЕ РАЗВИТИЕ СНЭЭ В РФ

С целью выявления факторов, ограничивающих развитие СНЭЭ в РФ, был проведён опрос специалистов, занимающихся реализацией проектов в области СНЭЭ в нашей стране. По итогам опроса сформулированы следующие основные проблемы:

1. *Отсутствие государственной программы поддержки проектов в области СНЭЭ.* В странах, занимающих сейчас лидирующие позиции на мировом рынке СНЭЭ, в своё время технологии накопления совершили качественный скачок именно благодаря комплексной государственной поддержке проектов в области СНЭЭ. В России в настоящее время такая поддержка отсутствует;

2. *Высокая стоимость СНЭЭ при относительно низкой стоимости электроэнергии в РФ.* Удельная стоимость СНЭЭ сильно зависит от используемых накопителей энергии, функционала и исполнения СНЭЭ и множества других факторов, однако в любом случае она по-прежнему достаточно высока. Стоимость электроэнергии в РФ неуклонно растёт, особенно для промышленных потребителей [9], но всё же она остаётся относительно низкой, из-за чего экономический эффект, например, от снижения расходов на электроэнергию посредством коррекции графика нагрузки, во многих случаях не позволяет окупить затраты на СНЭЭ.

3. *Малая доля ВИЭ в ЕЭС России и в большинстве ОЭС.* Область применения СНЭЭ не ограничивается повышением эффективности возобновляемых источников энергии, однако, как показывает мировой опыт, последние являются значимым драйвером развития СНЭЭ. При этом на 01.01.2020 г. доля СЭС и ВЭС в структуре установленной мощности электростанций ЕЭС России составляет лишь 0,55 и 0,07 % соответственно, а в структуре выработки электроэнергии – 0,12 и 0,03 % соответственно [10];

4. *Медленное формирование нормативно-технической основы для применения СНЭЭ.* В России постепенно разрабатываются нормативно-технические документы в области СНЭЭ, с 1 ноября 2020 г. вступают в силу два очередных национальных стандарта в области СНЭЭ: ГОСТ Р 58092.2.1–2020 и ГОСТ Р 58092.3.1–2020 [11]. Также вносятся изменения, необходимые для применения СНЭЭ, в действующие документы. Однако всё это происходит крайне медленно, и при реализации проектов в области СНЭЭ и заказчик, и исполнитель, сталкиваются с неопределённостью, отсутствием соответствующей нормативно-технической документации.

5. *Инерция мышления.* Для человеческого разума свойственна инерционность, часто выражающаяся в отторжении принципиально новых решений. В российской электроэнергетике СНЭЭ относится к таким решениям. Реализованных проектов по-прежнему очень мало. Более того, в открытом доступе нет информации о технической и

экономической эффективности многих реализованных проектов. Соответственно, у лиц, принимающих решения, появляются сомнения в отношении даже пилотных проектов в области СНЭЭ. Ситуация отягощается тем, что и для рядового персонала установка СНЭЭ, её эксплуатация и техническое обслуживание представляются чем-то неизведанным.

6. *Ограниченный срок службы, его зависимость от глубины разряда, допустимый ток заряда и другие ограничения накопителей энергии.* Данные вопросы остро стоят в проектах в области СНЭЭ, реализуемых не только в России, но и по всему миру. Однако вследствие наличия факторов, описанных выше, многие потенциальные проекты в области СНЭЭ в РФ находятся на границе окупаемости, и часто в определении их эффективности решающим фактором оказываются технические параметры аккумуляторов.

Необходимо отметить, что влияние указанных факторов может быть компенсировано посредством государственной поддержки, как это указано в описании фактора № 1, и соответствующая программа поддержки запланирована. Согласно Плану мероприятий («Дорожной карте») по совершенствованию законодательства и устранению административных барьеров в целях обеспечения реализации НТИ по направлению «Энерджинет», разработка экономически обоснованного механизма поддержки строительства систем накопления энергии будет осуществлена в срок до декабря 2021 г. [12].

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мировой рынок СНЭЭ интенсивно развивается: совершенствуются технологии, накапливается опыт реализованных проектов. В наибольшей степени увеличиваются масштабы применения СНЭЭ на основе литий-ионных аккумуляторов - благодаря двукратному снижению стоимости последних за прошедшее десятилетие. СНЭЭ стали принципиально новым элементом централизованных и автономных энергосистем, позволяющим эффективно решать многие задачи при управлении нормальными и аварийными режимами. В будущем следует ожидать дальнейшего увеличения значимости СНЭЭ для электроэнергетики, в частности, роста количества проектов, где в полной мере используется многофункциональность СНЭЭ.

Анализ российского опыта применения СНЭЭ показывает значительное отставание РФ от ряда стран, в которых технологии накопления получили широкую практическую реализацию. В нашей стране реализован ряд проектов по установке СНЭЭ на энергообъектах ЕЭС России, однако большая часть из них была предназначена для «отработки» новых технологий и не подразумевала коммерческой выгоды. В современных реалиях наибольший технический и экономический эффект от применения СНЭЭ в РФ может быть получен в автономных энергосистемах, работающих изолированно или имеющих слабую связь с ЕЭС России. Ярким примером является применение СНЭЭ в составе автономных гибридных энергоустановок на основе ВИЭ и традиционной генерации. Данное направление активно развивается с 2017 г. за это время СНЭЭ были установлены на трёх солнечно-дизельных электростанциях, ещё четыре СНЭЭ для аналогичных энергообъектов находятся в процессе производства.

Следует отдельно отметить высокий потенциал применения СНЭЭ в автономных энергосистемах объектов нефтегазового сектора экономики, где потребители в основном имеют стохастическую резкопеременную нагрузку, мощность которой соизмерима с мощностью электростанций. Преобладающая доля выработки электроэнергии на таких электростанциях производится дизельными, газопоршневыми и газотурбинными установками. Требования к СНЭЭ для обеспечения надёжной и эффективной работы таких электростанций по мощности и энергоёмкости достаточно невысоки и вполне реализуемы в настоящее время, что даёт возможность накопить опыт эксплуатации СНЭЭ, отработать алгоритмы и законы управления ими. По мере отработки технологии и неизбежного снижения себестоимости СНЭЭ будут всё более востребованы и в «большой» энергетике для решения задач, рассматриваемых в настоящей статье.

Список литературы

- [1] Zobaa, A.F. "Energy storage technologies and applications." Rijeka, Croatia: Intech, 2013., - 328 p.
- [2] Robyns B., François B., et al., "Energy storage in electric power grids." UK: ISTE and John Wiley & Sons, 2015.
- [3] Li J., Xiong R., Yang Q., et al., "Design/test of a hybrid energy storage system for primary frequency control using a dynamic droop method in an isolated microgrid power system", in Applied Energy, 2017, vol. 201, pp. 257–269.
- [4] Куликов Ю.А. Накопители электроэнергии - эффективный инструмент управления режимами электроэнергетических систем / Электроэнергетика глазами молодежи – 2018 : материалы 9 междунар. молодеж. науч.-техн. конф., Казань, 1–5 окт. 2018 г. В 3 т. – Казань : Казан. гос. энергет. ун-т, 2018. – Т. 1. – С. 38–43.
- [5] Бушуев В.В., Лизалек Н.Н., Новиков Н.Л. Динамические свойства энергообъединений. М.: Энергоатомиздат, 1995. 319 С.
- [6] Илюшин П.В., Куликов А.Л., Березовский П.К. Эффективное использование накопителей электрической энергии для предотвращения отключений объектов распределенной генерации при кратковременных отклонениях частоты / Релейная защита и автоматизация – 2019, № 4. стр. 32–39.
- [7] 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-101200-400) and gas piston units in experimental power system / П. А. Бачурин, Д. С. Гладков, В. М. Зырянов, С. В. Кучак, Г. Б. Нестеренко, Д. Е. Лебедев, А. Н. Решетников [и др.] // Электроэнергия. Передача и распределение. - 2020. - № 2 (59). - С. 18-24.
- [8] Global energy storage database. [Электронный ресурс] URL: <http://www.energystorageexchange.org/projects>. (дата обращения: 09.12.2019).
- [9] Средняя цена электроэнергии для промышленности в России в 2018 году превысит соответствующий уровень цен в 15 штатах США и 6 странах Евросоюза [Электронный ресурс] / Ассоциация «Сообщество потребителей энергии». — 2018. Режим доступа: <https://www.np-ace.ru/news/partnership/1057/>. — Проверено 15.05.2020.
- [10] Единая энергетическая система России [Электронный ресурс] / АО «СО ЕЭС». – 2020. Режим доступа: <https://so-ups.ru/index.php?id=ees>. – Проверено 31.08.2020.
- [11] ООО «СНЭ» успешно завершило разработку национальных стандартов Российской Федерации [Электронный ресурс] / ООО «Системы накопления энергии». – 2020. Режим доступа: <http://estorsys.ru/novosti-kompanii/170-ooo-sne-usheshno-zavershila-razrabotku-natsionalnykh-standartov-rossijskoj-federatsii>. – Проверено 31.08.2020.
- [12] План мероприятий («Дорожная карта») по совершенствованию законодательства и устранению административных барьеров в целях обеспечения реализации НТИ по направлению «Энерджинет» / Утверждён распоряжением Правительства РФ от 09.06.2020 № 1526 р.

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

<i>Ерохин П.М., Куликов Ю.А., Москвин И.А.</i> Технологическая модернизация ЕЭС России	23
<i>Шестакова В.В.</i> Исследование влияния производства и эксплуатации возобновляемых источников энергии на окружающую среду на примере солнечных фотоэлектрических панелей	29
<i>Паскаль Д.В., Шевчук С.А.</i> Информационный обмен с использованием СІМ: опыт автоматизированного обмена информацией АО «СО ЕЭС» с АО «ЕЭСК»	31
<i>Нестеренко Г.Б., Зырянов В.М., Кирьянова Н.Г., Коротков И.Ю., Рудюк И.Ф.</i> Системы накопления электрической энергии. Возможное применение и проблемы развития	35
<i>Неуймин В.Г., Александров А.С., Сацук Е.И., Михайленко А.Ф., Останин А.Ю.</i> Система мониторинга запасов устойчивости при планировании и управлении электроэнергетическим режимом ЕЭС России	42
<i>Кононов Ю.Г., Липский Р.Н.</i> Перспективы применения интеллектуальных информационно-измерительных систем в электрических сетях	46

1. УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ РЕЖИМАМИ ЭНЕРГОСИСТЕМ

<i>Шевелев И.В.</i> Автоматизация процесса проверки совместимости исходных данных и обеспечения баланса мощности в энергорайонах при определении планового перечня включаемых в работу объектов генерации	59
<i>Чувашева Н.Н.</i> Учет локальной противоаварийной автоматики в технологическом алгоритме ЦСПА	63
<i>Артемьева А.А.</i> Имитационный полигон ЦСПА и СМЗУ на базе режимного тренажера диспетчера «ФИНИСТ»	67
<i>Назаров А.А.</i> Оценка приоритетности ремонта оборудования с учетом схемно-режимной значимости	71
<i>Бончук И.А.</i> Оперативный прогноз потребления мощности в энергосистеме Калининградской области	75
<i>Ильяшенко П.Л., Труфакин С.С.</i> Использование RASTRWІN3, СМЗУ для определения расчётных параметров электроэнергетического режима в автоматическом режиме	79
<i>Першко Е.А., Беляев А.Н.</i> Повышение статической и динамической устойчивости энергосистемы за счет управления по данным векторных измерений	81
<i>Глашев Д.С., Толстихина Л.В.</i> Модель каскада деривационных ГЭС с нечётким регулятором	85
<i>Семеренко А.А., Зубкова И.С.</i> Применение электропередач переменного и постоянного тока при проектировании сетей большой размерности	89
<i>Мотовилов А.И.</i> Увеличение допустимых перетоков с помощью изменения параметров электрической сети	93
<i>Вялкова С.А., Надтока И.И.</i> Прогнозирование суточного графика активной мощности г. Москвы с учетом естественной освещенности	97
<i>Вялкова С.А.</i> Прогноз естественной освещенности для краткосрочного прогнозирования активной мощности энергосистемы	101
<i>Буслов В.В.</i> Учет договоров на технологическое присоединение в прогнозировании изменения нагрузок энергосистемы	105
<i>Мясникова Н.Ю.</i> Прогнозирование электропотребления с использованием нейронных сетей	109
<i>Гранина Л.А., Толстихина Л.В.</i> Разработка имитационной нелинейной модели гидротурбины для исследования режима работы гидроагрегата	113