

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», доктор физико-математическ

ОТЗЫВ

Ведущей организации Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» на диссертационную работу Какоши Юрия Васильевича «Свойства и режимы объединенных энергосистем малой мощности, создаваемых на основе локальных систем энергоснабжения», представленную к защите в Диссертационном совете 24.2.347.05 при ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.3 – Электроэнергетика

Актуальность темы диссертации.

Широкие возможности использования природного газа в качестве основного источника энергии позволили предприятиям различных сфер экономики создавать собственные источники энергии на основе газотурбинных и газопоршневых когенерационных установок. Все больше появляются сбалансированные локальные интеллектуальные энергосистемы (ЛИЭС) различного назначения, чаще работающие автономно, так как процесс их объединения с ЕЭС России предполагает взаимный обмен мощностью и энергией. Выдача мощности в сеть в свою очередь противоречит интересам сетевых организаций и системного оператора. ПНеобходимость преодоления созданных крупными участниками электроэнергетики административных и технологических барьеров и препятствий снижает техническую и экономическую эффективность ЛИЭС, способных приносить значимые полезные системные эффекты.

Создание объединенных энергосистем малой мощности (ОЭСММ) на базе нескольких ЛИЭС может исключить необходимость преодолевать нормативные и административные барьеры на пути интеграции ЛИЭС в существующие электрические сети централизованного энергоснабжения для достижения положительных системных эффектов от объединения путем создания независимых энергосистем, обладающих собственной автономностью, высокой надежностью электроснабжения потребителей, экономичностью выработки и передачи энергии.

Для решения данной задачи необходима разработка теоретических основ и технологии децентрализованного управления ОЭСММ, которые позволили бы упростить и существенно снизить затраты на интеграцию объектов с синхронной малой генерацией, как в существующие электрические сети ЕЭС, так и обеспечить эффективное электроснабжение потребителей и экономичность энергопроизводства в ОЭСММ.

Таким образом, разработка теоретических основ создания и способов управления режимами объединенных локальных интеллектуальных энергосистем малой мощности (ОЭСММ), является актуальной и востребованной.

Научная новизна работы состоит в следующем.

1. Впервые введено понятие ОЭСММ на базе нескольких ЛИЭС, предложен способ адаптивного участия электростанции ЛИЭС в ОПРЧ для их создания и управления режимами.

2. Предложена структура системных эффектов от создания ОЭСММ, исследованы их технологические особенности и перспективность использования.

3. Разработана методика сравнительной оценки системных свойств ОЭСММ при вариативности их создания.

Диссертационная работа соответствует паспорту научной специальности паспорту научной специальности 2.4.3 – Электроэнергетика, в т.ч. следующим пунктам паспорта:

П.№ 14. Разработка методов расчета и моделирования установившихся режимов, переходных процессов и устойчивости электроэнергетических систем и сетей, включая технико-экономическое обоснование технических решений, разработка методов управления режимами их работы;

П.№ 18. Разработка методов анализа структурной, балансовой и функциональной надежности электроэнергетических систем и систем электроснабжения, мини- и микрогрид.

Диссертант сформулировал и **выносит на защиту следующие основные положения.**

1. Объединение ЛИЭС в ОЭСММ позволяет создавать положительные системные эффекты по надежности энергоснабжения и экономичности использования генерирующего оборудования, близкие к эффектам от их интеграции в системы централизованного энергоснабжения.

2. Развитие районных систем энергоснабжения путем объединения ЛИЭС с созданием энергосистем малой мощности (ОЭСММ) позволяет радикально упростить структуру электрических сетей без снижения надежности и экономичности.

3. В ОЭСММ экономически и технологически целесообразно децентрализованное мультиагентное управление режимами.

Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы состоит в следующем:

Решена научно-техническая задача по созданию теоретических основ проектирования и управления режимами ОЭСММ. Способ адаптивного управления мощностью генерации в ЛИЭС защищен патентом РФ и реализован в системной автоматике, обеспечивающей безопасную синхронную работу ЛИЭС с внешней энергосистемой.

Способ управления режимами генераторов нашел отражение в картах настройки системной автоматики, а именно – введена адаптивная характеристика с мертвой полосой первичного регулирования в различных режимах работы ЛИЭС, что позволило стабилизировать загрузку генерирующего оборудования электростанции ЛИЭС и, при этом, обеспечило требуемое участие в общем первичном регулировании частоты (ОПРЧ) ЕЭС в режиме параллельной работы с внешней электрической сетью.

Результаты работ использованы в обучающем дистанционном курсе для магистрантов НГТУ «Инновационные технологии в электроэнергетике», что подтверждается соответствующим актом о внедрении в учебный процесс.

Достоверность результатов

Достоверность результатов подтверждена использованием промышленной программы для имитационного моделирования режимов энергосистем с предварительной верификацией динамических характеристик энергоблоков, использованием результатов экспериментальных исследований свойств реальной ЛИЭС, а также результатами опытной и промышленной эксплуатации предложенного в работе способа адаптивного участия энергоблоков электростанции ЛИЭС.

Личный вклад диссертанта не вызывает сомнений и состоит в получении результатов, изложенных в диссертации, в анализе особенностей работы объединённых энергосистем малой мощности (ОЭСММ) на основе ЛИЭС в островном и параллельном с энергосистемой централизованного энергоснабжения режимах, исследовании системных свойств ОЭСММ, разработанной методике сравнительной оценки вариантов объединения ЛИЭС, поиске и анализе реальных условий создания ОЭСММ, формулировании выводов исследования.

Работы по математическому моделированию, вычислительные, обзорно-аналитические и прикладные исследования, представленные в диссертации,

проведены, под его научным руководством и при его непосредственном участии.

Апробация результатов выполнялась на многих международных и российских конференциях, в частности на: а) Международной научно-практической конференции «Альтернативная и интеллектуальная энергетика», 2018; б) 54 International universities power engineering conference (UPEC), Romania, Bucharest 2019; в) «Энергетика XXI века: Устойчивое развитие и интеллектуальное управление», г. Иркутск, 2020; г) International Conference on Modern Power Systems (MPS), Romania, Cluj-Napoca, 2021.

Публикации. Результаты диссертационной работы опубликованы в 10 научных работах, из них работ, опубликованных согласно перечню российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (перечень ВАК РФ) – 3, патентов РФ – 1.

Объем и структура диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений, списка терминов и определений, списка литературы, включающего 105 наименований, и пяти приложений. Общий объем работы составляет 168 страниц, включает 58 рисунков и 23 таблицы.

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований, приведены положения, выносимые на защиту, указаны новизна полученных результатов, их научная и практическая значимость, представлены структура диссертации и основные результаты исследований.

В **первой главе** представлены связанные с темой работы мировые и российские тренды развития электроэнергетики, одним из которых является тренд преимущественного развития газовой распределенной когенерации. Как итог появились локальные системы энергоснабжения с собственными объектами малой генерации, требующими «умное», не централизованное управление. Для обозначения таких сетей на западе было введено понятие SmartGrid, а в России, понятия, охватывающие это направление – Локальные интеллектуальные энергосистемы (ЛИЭС), мини – и микрогрид.

В главе приводятся виды объектов с МГ с различными назначениями и требованиями к системной автоматике и энергоисточнику, из которых выделяется локальная система энергоснабжения (ЛСЭ), имеющая большие недостатки при автономной работе в виде низкой надежности электроснабжения потребителей, качества электроэнергии, эффективности использования генерирующего оборудования. Принципиально их можно устранить путем включения ЛСЭ на параллельную работу с централизованной энергосистемой, а именно путем создания на базе ЛСЭ ЛИЭС, способных работать, как автономно, так и параллельно с внешней сетью. Однако, даже при условии обеспечения безопасной работы оборудования, административные и нормативно-технические барьеры интеграции ЛИЭС в сети ЦЭС остаются высокими.

Системные эффекты, соизмеримые с эффектами интеграции ЛИЭС в сети ЦЭС могут быть получены и другими путями, в частности, при создании на базе нескольких ЛИЭС ОЭСММ. При этом административных и нормативно-технических барьеров на этом пути практически не существует, а возможности их последующей интеграции с внешней энергосистемой ЦЭС сохраняются.

Во **второй главе** рассмотрены различные варианты режимов ЛИЭС и их интеграции между собой и с внешней электрической сетью. В главе определены и обоснованы основные положительные системные эффекты, достигаемые при создании ОЭСММ и определении режимов их работы, такие как Эффект повышения надежности электроснабжения, Эффект сглаживания графика нагрузки, Эффект повышения коэффициента использования установленных мощностей (КИУМ) генерирующего оборудования, Эффект повышения качества ЭЭ по напряжению, Эффект стабилизации частоты, Эффект локальной живучести и другие.

Положительные эффекты от возможной интеграции ОЭСММ во внешнюю электрическую сеть, такие как устранение дефицита мощности в энергодефицитных районах и отдельных узлах внешней сети, повышение уровня напряжения в точках примыкания ОЭСММ к сети, резервирование электроснабжения, позволяют рассматривать возможность снятия или уменьшения административных барьеров (внесение изменений в нормативные документы) при наличии технологических возможностей. Для ОЭСММ это также означает возникновение дополнительных преимуществ, связанных с повышением качества электроэнергии по частоте и напряжению, а также многовариантностью сбалансированного отделения частей ОЭСММ и автоматического восстановления параллельной работы.

Автором предложена методика экспертной оценки системных эффектов от объединения ЛИЭС в ОЭСММ, которая использует накопленный опыт проектирования и эксплуатации ЛИЭС, их интеграции с системами централизованного энергоснабжения, что позволяет многофокусно рассмотреть и сопоставить различными экспертными группами возникающие системные эффекты. Она может служить как основным, так и дополнительным инструментом принятия проектных решений по созданию изолированных, интегрированных в централизованные системы ЛИЭС, а также ОЭСММ на их основе.

В **третьей главе** обосновывается применение специализированных способов и предлагаются новые технические решения задач управления режимами ОЭСММ на базе нескольких ЛИЭС.

Обосновано, что для управления режимами ОЭСММ в силу особенностей их назначения и формирования предпочтительно децентрализованное управление. Для его реализации необходимы специализированные способы, к числу основных из которых следует отнести регулирование частоты в нормальных режимах, противоаварийное разделение на сбалансированные подсистемы в аварийных и автоматическое восстановление целостности системы и нормального режима в

послеаварийных. В работе предложены способ децентрализованного регулирования частоты и мощности в ОЭСММ при изолированной работе; адаптивное первичное регулирование частоты электростанциями ЛИЭС и ОЭСММ для режимов автономной и параллельной работы с ЦЭС; восстановление целостности и нормального режима ОЭСММ после ее аварийного или противоаварийного разделения.

Предложенные технические решения позволяют осуществить системные функции ОЭСММ и получить максимальные системные эффекты по надежности, экономичности и экологичности производства и передачи тепловой и электрической энергии, сохраняя при этом безопасность работы оборудования ОЭСММ.

В четвёртой главе исследованы режимные свойства ОЭСММ, определяющие их надежность и экономическую эффективность, выявлены особенности работы ОЭСММ в зависимости от их структурного выполнения и его влияния на системные свойства ОЭСММ. Интерес представляет влияние объединения ЛИЭС в ОЭСММ на такие свойства и отражающие их характеристики, как:

- Способность сохранять работоспособность при больших нарушениях балансов активной и реактивной мощностей.
- Способность допускать пуски крупных асинхронных двигателей, ограничивающую возможность их использования в режимах изолированной работы.
- Способность обеспечивать динамическую стабильность частоты при нерегулярных колебаниях мощности.
- Способность работать в широком диапазоне изменения суммарной нагрузки.
- Способность обеспечивать перераспределение суммарной нагрузки между электростанциями ЛИЭС, входящими в ОЭСММ.
- Способность сохранять естественную динамическую устойчивость параллельной работы электростанций в ОЭСММ при широкой вариации исходных схемно-режимных условий и возмущений

В виду малой инерционности вращающихся масс энергоблоков электростанций ЛИЭС определяющими факторами устойчивости параллельной работы генераторов в ОЭСММ является сброс/наброс нагрузок, длительность КЗ, эффективность противоаварийного разделения. Исследования показали, что в случае укрупнения общей установленной мощности ОЭСММ устойчивость параллельной работы с внешней энергосистемой, динамическая стабильность частоты в автономном режиме повышается. Объединение ЛИЭС в ОЭСММ повышает успешность пусков мощных АД, что положительно сказывается на качестве и надежности энергоснабжения. Результаты исследования показали, что относительные нерегулярные колебания мощности в ОЭСММ не могут корректно оцениваться по моделям, рекомендованным для крупных энергосистем и энергообъединений и нуждаются в специальном исследовании на этапе

проектирования ОЭСММ. Укрупнение мощности ОЭСММ снижает влияние нерегулярных колебаний на стабильность частоты, а подключение ОЭСММ к внешней централизованной энергосистеме позволяет практически полностью исключить данное влияние за счет обменной мощности с внешней системой. Способность работать ОЭСММ в широком диапазоне изменения и распределения суммарной нагрузки определяется максимально возможной несбалансированностью каждой из ЛИЭС, пропускной способности межсистемных связей, а также величиной нерегулярных колебаний мощности. При укрупнении ОЭСММ выравнивается общий график нагрузки системы, снижаются относительные нерегулярные колебания мощности, что способствует повышению экономичности использования установленных генерирующих мощностей.

Пятая глава посвящена описанию объектов, для которых осуществляется проверка целесообразности и технических возможностей создания ОЭСММ, а также выявление особенностей их проектирования. В работе показано разнообразие объектов, предрасположенных к созданию ОЭСММ. Расположенные на относительно небольших расстояниях друг от друга энергоцентры с собственными нагрузками, которые ограничены по подключению к внешним электрическим сетям (технологические и административные барьеры, отсутствие внешних сетей), могут быть объединены в ОЭСММ, что позволяет стратегически изменить схемы развития энергорайонов. Для любого типа объектов могут быть применены принципы, рассмотренные в данной работе, а также дополнительно исследованы вопросы работы противоаварийной автоматики в частично разделенной ОЭСММ, вопросы компенсации токов замыкания на землю, определения приоритетности и автоматического выбора станций, осуществляющей вторичное регулирование частоты и мощности и т.д. При решении комплексных задач создания ОЭСММ с использованием мультиагентного управления для надежного управления режимами ОЭСММ показано, что не существует технологических и других ограничений по укрупнению ОЭСММ и присоединению новых ЛИЭС. Мощность создаваемых объектов может исчисляться сотнями МВт.

В заключении сформированы основные результаты диссертационной работы, главными из которых являются:

- Обоснование целесообразности и технологической реализуемости создания ОЭСММ на базе ЛИЭС как альтернативы их интеграции в ЦЭС.
- Методика проведения экспертного индикативного анализа вариантов автономной работы ЛИЭС и их интеграции в сети ЦЭС и в ОЭСММ.
- Способ участия ЛИЭС в ОПРЧ с адаптивными характеристиками.
- Результаты исследования режимных свойств ОЭСММ с их обобщением, позволяющие делать предварительные оценки особенностей режимов проектируемых ОЭСММ.
- Примеры объектов, предрасположенных к созданию ОЭСММ, их характерные особенности.

Основные результаты в комплексе могут быть использованы в качестве прототипа необходимых исследований режимов и технических решений при проектировании ОЭСММ, интеграции ЛИЭС с системами ЦЭС.

В приложении А Бланки и результаты опросов экспертов применяемого индикативного экспертного метода сравнения вариантов объединения ЛИЭС.

В приложении Б приведена карта настройки системной автоматики, защиты энергоблоков и сети с введенной адаптивной характеристикой с мертвой полосой первичного регулирования в различных режимах работы ЛИЭС.

В приложении В приведена Расчетная математическая модель ОЭСММ, состоящей из 2 и из 3 ЛИЭС.

Приложение Г содержит результаты визуального обследования Южно-Курильской ДЭС и распределительных сетей.

Приложение Д является актом внедрения в учебный процесс НГТУ результатов диссертационной работы

Автореферат соответствует содержанию диссертации и полностью отражает основные научные и прикладные результаты диссертационного исследования.

Автореферат и текст диссертации хорошо структурированы, логично изложены и обладают внутренним единством. По объёму, структуре и оформлению диссертационная работа полностью соответствует требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора технических наук.

Замечания по диссертационной работе

1. В работе достаточно большое внимание уделяется достоинствам объединения ЛИЭС в ОЭСММ, но практически не рассмотрены недостатки такого объединения.
2. Несмотря на все перечисленные в работе преимущества слияния ЛИЭС в ОЭСММ, не обозначено, что их объединение может быть затруднено ввиду возможных особенностей технологических процессов внутри индивидуальных ЛИЭС и их влияния на общий режим работы ОЭСММ предоставляя преимущества одним участникам, и ухудшая условия для других. Рассмотренные в работе пуски крупных асинхронных двигателей со снижением частоты и напряжения внутри одной ЛИЭС, пусть и не столь глубокими в ОЭСММ, могут быть неприемлемы для электроприемников и технологического процесса другой ЛИЭС.
3. Не рассмотрены в явном виде ограничивающие факторы на максимальную мощность, дальность и принципиальную возможность объединения ЛИЭС в ОЭСММ. В частности, на практике всегда существует ограничение по величине токов короткого замыкания в ОЭСММ, превышение которой не устраняется реактированием и приводит к необходимости замены первичного электрооборудования всех ЛИЭС, что перечеркивает технико-экономические преимущества от объединения.

4. В работе часто упоминается понятие "надёжность", но не разделены структурная, балансовая и режимная надёжность, а также не пояснено, какие из показателей надёжности улучшатся при объединении ЛИЭС в ОЭСММ, а какие - ухудшатся.
5. Какова должна быть модель розничного рынка внутри ОЭСММ, чтобы стимулировать субъектов энергетики ЛИЭС на реализацию рассмотренных в работе балансовых преимуществ ОЭСММ и её системных услуг?
6. Решения, основанные на передаче GOOSE-сообщений могут давать задержку на доставку сигналов через цифровую коммуникационную сеть до 140 мс, даже при использовании оптических жил ВОК. В связи с чем описываемые быстродействующие механизмы опережающего деления сети, надёжно работающие в течение порядка 70 мс, возможно реализовать только при условии использования менее протяженных аналоговых каналов связи. Стоит пояснить с точки зрения реализации коммуникационного обмена, каким образом обеспечивается гармонизация параметров синхронизации в несинхронно работающих ЛИЭС при условии, что точка синхронизации может быть значительно удалена от генераторов, расположенных внутри ЛИЭС. Можно ли обойтись в данной системе синхронизации без организации централизованной системы координированного управления.
7. С учетом предложений по «сжатию» регулировочных диапазонов регуляторов скорости энергоблоков ЛИЭС при переходе с параллельной работы в изолированную работу можно ли полностью отказаться от статизма первичного регулирования?
8. В работе описан процесс и пример активации генераторов, выполняющих роль ведущих при реализации вторичного регулирования в ОЭСММ. Однако остается неясным, возможны ли случаи обратного перехода «вниз» по иерархии приоритетов, особенно в ситуациях, когда переход «вверх» на следующий генератор выполнялся по причине исчерпания регулировочного диапазона предыдущего генератора.

Общее заключение

Диссертационная работа Какоши Юрия Васильевича «Свойства и режимы объединенных энергосистем малой мощности, создаваемых на основе локальных систем энергоснабжения», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.3 – Электроэнергетика является актуальной, обладает научной новизной и практической значимости, и является законченной научно-квалификационной работой. Диссертационная работа удовлетворяет требованиям, установленным в пп. 9 - 14 Положения «О присуждении учёных степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации № 842

от 24.09.2013 г. (с изменениями от 11.09.2021 г.), предъявляемым к кандидатским диссертациям.

Автор диссертации, Какоша Юрий Васильевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.3 – Электроэнергетика.

Отзыв на диссертацию обсужден и одобрен на заседании кафедры «Автоматизированные электрические системы» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», протокол заседания № 6 от 05.09.2024 г.

Отзыв подготовлен доктором технических наук, заведующим кафедрой «Автоматизированные электрические системы», профессором Паздериним Андреем Владимировичем.

Заведующий кафедрой
«Автоматизированные
электрические системы»,
доктор технических
наук, профессор

Андрей Владимирович Паздерин

Тел. +7 (343) 375 48 75
Эл. почта: a.v.pazderin@urfu.ru

Подпись А.В. Паздерина заверяю:

Сведения о ведущей организации

Полное наименование организации: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Юридический адрес: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19

Сайт: <https://urfu.ru/>

Тел: 8 (343) 3754444

Эл. почта: rector@urfu.ru

Отзыв получен 20.09.2024г. *Сидоров А. А.*
Отзыв получен 20.09.2024 (ознакомлен) *Какоша Ю. В.*