

## ОТЗЫВ

официального оппонента Гольдштейна Валерия Геннадьевича на диссертационную работу Кечкина Александра Юрьевича «Повышение эффективности электроснабжения энергоудаленных потребителей на основе технологий «виртуальной электростанции», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы».

### 1. Актуальность проблемы и темы диссертационной работы.

Важнейшими положениями общегосударственной проблемы повышения эффективности систем электроснабжения (СЭС) при современных жестких требованиях по энергосбережению и надежности являются применение инновационных технологий и электроустановок в сочетании с оптимальными решениями в энергоснабжении, его структурах и системах управления.

Особое место в реализации этих положений занимает использование распределенной генерации (РГ), которая является актуальным трендом развития электроэнергетики. При конкурентной оценке централизованных и децентрализованных систем электроснабжения (ЦСЭ и ДСЭ), особенно, для энергоудаленных потребителей, можно констатировать, что в настоящее время для ДСЭ характерно кардинальное улучшение показателей, таких, как надежность и качество электроэнергии, удельный расход органического топлива, а также нарушения электроснабжения. Кроме того, ДСЭ имеют несомненные преимущества по сравнению с ЦСЭ в использовании экологически чистых технологий и снижении капитальных затрат, прежде всего, на отчуждаемые территории.

Перспективным подходом, открывающим новые возможности при проектировании ДСЭ, является использование технологий «виртуальной электростанции» (ВиЭС). Объединение на основе технологий ВиЭС нескольких ДСЭ в единый электротехнический комплекс (ЭТК) позволяет эффективно использовать генерацию от возобновляемых источников энергии (ВИЭ), снизить потребление органического топлива, по-новому рассматривать вопросы определения тарифов и др. Однако практическое использование объединения ДСЭ с разнообразными источниками в единый ЭТК существенно ограничено.

При его проектировании возникает ряд технико-экономических вопросов, которые, в частности, связаны с выбором оптимальной топологии электрической сети таких ЭТК. Существующие методы и подходы к данной проблеме характеризуются сложностью адаптации оптимизационных алгоритмов

к конкретному объекту, трудоемкостью вычислений и большим объемом требуемых исходных данных.

Поэтому можно констатировать актуальность диссертационной работы Кечкина А.Ю., направленной на повышение эффективности ДСЭ энергоудаленных потребителей. В ней используется перспективный подход, связанный с объединением ряда ДСЭ в обобщенный ЭТК, функционирующий по принципу «виртуальной электростанции» и имеющий оптимальную топологию электрической сети. Для реализации этого подхода Кечкиным А.Ю. разработаны имитационная компьютерная и физическая модели названного ЭТК, алгоритм, позволяющий на этапе проектирования определить оптимальную (по минимальным потерям мощности) топологию его электрической сети, проведены теоретические и экспериментальные исследования режимов работы данного ЭТК и др.

Особое значение и актуальность представленная работа имеет для распределенной энергетики, в частности при проектировании и реконструкции ДСЭ с ВИЭ.

## **2. Обоснованность и достоверность полученных результатов**

Положения и выводы, представленные в диссертационной работе, в достаточной степени аргументированы, апробированы на многочисленных научных конференциях (в том числе международных) и отражены в 24 опубликованных работах, две из которых в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ и две – в изданиях, индексируемых в базе Scopus.

Достоверность полученных результатов подтверждается корректным и обоснованным применением фундаментальных законов электротехники, применением апробированных методов компьютерного моделирования электротехнических комплексов, корректностью и адекватностью принятых допущений, а также результатами экспериментальных исследований, полученных с помощью поверенных измерительных приборов.

## **3. Научная новизна проведенных исследований и полученных результатов**

Научную новизну и ценность диссертационной работы Кечкина А. Ю. определяют следующие результаты.

**Комплексная концепция и принципы** нового подхода к повышению эффективности электроснабжения энергоудаленных потребителей, предусматривающего объединение нескольких ДСЭ в единый ЭТК, функционирующий по принципу ВиЭС.

**Методология, разработка и реализация** алгоритма определения оптимальной топологии электрической сети данного ЭТК, базирующегося на интегральной оценке структурно-топологических характеристик (СТХ) сети.

**Обеспечение репрезентативности и достоверности** результатов работы с помощью синтезированной имитационной компьютерной модели ЭТК, объединяющего три ДСЭ, что позволяет проводить теоретические исследования параметров нормальных режимов при различных сценариях работы ЭТК.

**Разработка физической модели** (в виде лабораторного стенда) названного ЭТК с источниками малой РГ. Модель позволяет осуществлять экспериментальные исследования параметров режимов и показателей качества электроэнергии при различных сценариях работы. В ней реализованы имитаторы солнечной электростанции, ветроэнергетической установки, накопителей электроэнергии, двигательной и резистивной нагрузки, объединенных на общей шине переменного тока.

По мнению оппонента, названные выше положения являются новыми оригинальными научными разработками автора работы.

#### **4. Практическая значимость результатов, полученных в диссертации**

Практическую значимость новых научных результатов, полученных Кечкиным А.Ю., можно определить следующими положениями.

- Несомненным достоинством работы является возможность использования ее научно-технических решений и рекомендаций при разработке пилотных проектов ВиЭС в России, а также проектировании и реконструкции ДСЭ энергоудаленных потребителей.
- Важным практическим результатом диссертационной работы является то, что ее материалы и, в частности, разработанный лабораторный стенд использованы при проведении научно-исследовательской работы ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева» в процессе выполнения государственного задания Минобрнауки России по

теме «Повышение эффективности использования малой РГ на основе технологий «виртуальной электростанции» (ГЗ № 13.2078.2017/4.6 от 31.05.2017).

- Кроме того, комплексная имитационная компьютерная модель, содержащая три ДСЭ (солнечной электростанции, ветроэнергетической установки, накопителей электроэнергии и др.), и их физический аналог в виде лабораторного стенда позволяют проводить в рамках учебного процесса кафедры «Электроэнергетика, электроснабжение и силовая электроника» исследования параметров нормальных режимов работы ЭТК.

## 5. Оценка содержания диссертации

Диссертация Кечкина А.Ю. изложена на 172 страницах (из них 130 страниц основного текста) и состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка использованных источников (207 наименований) и 6 приложений. Диссертация включает 47 рисунков, 31 таблицу. Содержание диссертации соответствует поставленным задачам исследования.

Во **введении** изложена общая характеристика работы, обоснована актуальность, научная новизна и практическая значимость диссертационного исследования, определены цель и задачи исследования, отмечен вклад соискателя, приведены сведения об апробации результатов работы и публикациях.

**Первая глава** посвящена исследованию особенностей электроснабжения энергоудаленных потребителей и подхода к повышению его эффективности.

Проведен анализ особенностей электроснабжения энергоудаленных потребителей, на основе которого разработана их классификация. Отмечены проблемы низкой эффективности существующих ДСЭ. Обоснована актуальность внедрения принципа и технологий ВиЭС для повышения эффективности электроснабжения энергоудаленных потребителей.

На основе анализа публикаций сформулировано наиболее общее определение ВиЭС. Приведены примеры и анализ пилотных проектов и разработана классификация отличительные особенности ВиЭС. Предложен подход к повышению эффективности электроснабжения энергоудаленных потребителей на основе объединения ДСЭ в единый ЭТК, функционирующий по принципу ВиЭС, и отмечен возможный полезный эффект.

Выполнен анализ подходов к определению оптимальной топологии электрической сети подобных ЭТК с учетом их достоинств и недостатков. Определена оценка трудоемкости использования имеющихся подходов, и ограничения их практического использования. Сформулированы и обоснованы цель и задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена разработке алгоритма определения оптимальной топологии электрической сети ЭТК, объединяющего несколько ДСЭ и функционирующего по принципу ВиЭС.

Предложены ограничения, направленные на устранение нецелесообразных или малоэффективных путей передачи электроэнергии при объединении нескольких ДСЭ в единый ЭТК.

С целью определения оптимальной топологии электрической сети ЭТК, объединяющего ДСЭ, предложено проводить структурный анализ сети. Рассмотрены особенности представления топологии электрической сети ЭТК с использованием теории графов. Для оценки структурных свойств сети предложен перечень СТХ: связность структуры, структурная избыточность, неравномерность распределения связей, структурная компактность, степень централизации в структуре. Для совокупного учета всех СТХ при сравнении возможных вариантов топологии электрической сети ЭТК предложено использовать интегральный показатель оценки сравниваемых топологий, определяемый с помощью метода взвешенных сумм критериев. Констатируются достоинства метода и сформулирована последовательность этапов его выполнения.

Разработан алгоритм определения оптимальной топологии электрической сети ЭТК, объединяющего несколько ДСЭ. Алгоритм отличается интегральной совокупной оценкой СТХ. Рассмотрена работа алгоритма, дана оценка его достоинств и недостатков, а также направлений по его совершенствованию. На примере объединения трех ДСЭ в единый ЭТК проведено исследование возможных вариантов топологии электрической сети и, на основе разработанного алгоритма, выбран оптимальный вариант.

**В третьей главе** представлено описание имитационной компьютерной модели, разработанной в программном комплексе PSCAD и позволяющей проводить исследование параметров режимов электрической сети ЭТК, в составе которого объединены несколько ДСЭ, и оценить потокораспределение в исследуемой сети. Приведены входные данные модели, ее функциональные возможности и принятые допущения. Показаны этапы разработки блоков модели. Объект моделирования соответствует ЭТК, рассмотренному в главе 2. На разработанную автором PSCAD-модель получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

На PSCAD-модели проведена проверка работы алгоритма определения оптимальной топологии электрической сети ЭТК, объединяющего ДСЭ. Для рассматриваемого в диссертации случая, использование разработанного алго-

ритма позволило определить вариант топологии сети, обеспечивающий наименьшую величину потерь мощности (до 27,6% ниже по сравнению с другими вариантами топологии). Показано, что объединение нескольких ДСЭ в ЭТК с использованием технологий ВиЭС позволяет снизить величину потерь мощности (для рассматриваемого случая на 41%) в системе, часть потребителей в которой удалены от источника питания, за счет обеспечения питания этих потребителей (часть времени) от более близких источников соседних систем.

По результатам исследования на PSCAD-модели режимов для 5 сценариев работы ЭТК, объединяющего ДСЭ, выделены сценарии, при которых нарушается нормальный режим работы. Выполнен анализ потокораспределения в электрической сети ЭТК. Установлено, что использование принципа ВиЭС для объединения ДСЭ в единый ЭТК позволяет осуществлять обмен мощностью между ДСЭ.

**Четвертая глава** посвящена экспериментальному исследованию на физической модели режимов работы ЭТК, объединяющего несколько ДСЭ и функционирующего по принципу ВиЭС, а также показателей качества электроэнергии при выдаче в электрическую сеть избытков мощности от объектов с энергоустановками на ВИЭ.

При участии автора разработана физическая модель ЭТК с источниками малой РГ, накопителями электроэнергии и нагрузкой, реализованная в виде лабораторного стенда. Приведены основные технические характеристики, конструктивные особенности и функциональные возможности стенда. На основании теоретических расчетов и физического моделирования установлено, что расхождения между расчетными и экспериментальными значениями электрических параметров не превышают 10 %, что свидетельствует о корректной работе лабораторного стенда и его соответствии реальному ЭТК.

С помощью физической модели проведены исследования параметров режима и качества электроэнергии при выдаче в сеть исследуемого ЭТК излишков мощности от источников РГ. Установлены причины возникновения отличных от нормального режимов работы и ухудшения качества электроэнергии. Разработаны рекомендации по устранению данных причин.

**В заключении** приведены выводы и основные результаты работы.

**В приложениях** представлены справочные материалы к расчету электрических нагрузок и выбору оптимальной топологии сети, результаты теоретических и экспериментальных исследований, технические характеристики

элементов лабораторного стенда, результаты интеллектуальной деятельности, акты внедрения результатов работы.

## **6. Соответствие диссертации и автореферата требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней**

- Диссертация Кечкина А.Ю., представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, полностью отвечает квалификационным признакам и принципам соответствия, которые установлены нормативным документом: «Положение о порядке присуждения ученых степеней», утвержденном Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г.
- Декларируемая диссертантом цель работы – *повышение эффективности децентрализованных систем электроснабжения энергоудаленных потребителей путем их объединения в электротехнический комплекс, имеющий оптимальную топологию электрической сети и функционирующий по принципу «виртуальной электростанции»* – полностью реализована в проведенных исследованиях, а полученные результаты с необходимой полнотой отражены в диссертации, автореферате, публикациях и апробации.
- Основные положения диссертационной работы своевременно опубликованы автором, в том числе, в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК (2 публикации), а также в изданиях, входящих в базу цитирования Scopus (2 публикации). Автором получено свидетельство на программу для ЭВМ. Всего по теме диссертации опубликовано 24 работы.
- На основании анализа представленной диссертации можно констатировать актуальность темы, новизну научных результатов, а также практическую значимость работы.
- Не вызывает сомнений достоверность и обоснованность сформулированных в ней научных положений.
- Изложение материала имеет четкую последовательность и содержит корректные решения заявленных задач, которые раскрывают положения, выдвигаемые на защиту, отвечая цели и предмету исследования, как квалификационной научной работы.
- Диссертационная работа Кечкина А.Ю. соответствует паспорту научной специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы» (далее выдержки из паспорта *курсивом*):

- по направлению исследования, посвященного «...*принципам и средствам управления объектами, определяющим функциональным свойствам действующих или создаваемых электротехнических комплексов ...*»;
- по области исследования, в котором производится «...*Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем (п. 1); обоснование совокупности технических, технологических, экономических, экологических и социальных критериев оценки принимаемых решений в области проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов и систем*» (п. 2); «... *разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления*» (п. 3), а также «...*исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах*» (п. 5);
- по объектам исследования, которыми являются «...*электротехнические комплексы и системы электроснабжения, электрооборудования ... и системы генерирования электрической энергии...*».

## **7. Дискуссионные положения, вопросы и критические замечания**

В процессе изучения работы Кечкина А.Ю. были отмечены следующие дискуссионные положения и замечания.

1. При обосновании актуальности работы в диссертации следовало бы сократить материал, посвященный технологиям и возможностям виртуальных электростанций. В то же время в автореферате этот материал представлен декларативно.

2. Очевиден повтор цели и задач работы на стр. 6, 7 и 32 диссертации.

3. В диссертации и автореферате при описании методов исследования – «...анализ, синтез, сравнение, классификация» отсутствует их привязка к содержанию работы.

4. Использование ограничения по допустимому значению тока в линии при объединении ДСЭ в единый ЭТК (§ 2.1 стр. 34) не имеет практического



смысла, поскольку допустимый длительный ток линии, определяемый тепловыми условиями ее работы, намного больше токов рабочих режимов с реальными КПД (выражения 2.3 – 2.5).

5. В составе способов формализованного задания графа на стр. 40 для расчета структурно-топологических характеристик следовало бы рассмотреть возможность использования табличного метода. С его помощью при минимальных затратах оперативной памяти можно решить все топологические задачи работы.

6. Неудачен термин в заголовке таблицы 1.1 на стр. 12 «Категории применения энергоудаленных потребителей», во многом совпадающий с известным определением в надежности энергоснабжения. Сама таблица вряд ли нужна, поскольку практически все ее содержание есть в тексте и рис. 1.1.

7. В работе отсутствует сравнение результатов проведенных расчетов по разработанному алгоритму (гл. 2) с известными решениями (таблица 1.5).

8. Требуется пояснения блок «Оценка топологии сети по дополнительным параметрам» в блок-схеме алгоритма, приведенной на рис. 2.2.

9. Предложенный алгоритм определения оптимальной топологии электрической сети электротехнического комплекса, объединяющего несколько децентрализованных систем электроснабжения, не учитывает возможную реконфигурацию сети в аварийных режимах.

10. В названии §3.2 диссертации вместо слов «Отработка алгоритма» было бы целесообразно использовать «Результаты исследования».

11. Приведенное на стр.76 утверждение - «наименьшие потери мощности при передаче от источников к потребителям соответствуют вариантам топологии с наибольшими значениями интегральной оценки  $K_j \dots$ » - не в полной мере соответствуют результатам таблицы 3.1.

12. Неясна смысловая нагрузка рис. 3.20 – 3.24, где представлены осциллограммы мгновенных значений напряжений ТП 0,4 кВ, ВЭУ, ГПУ, на шинах удаленного потребителя. Вероятно, было бы достаточно констатации, что он симметричны и стабильны по амплитуде.

13. Необходимо пояснить, учитывались ли и каким образом при получении основных результатов работы накопители электроэнергии, являющиеся важным компонентом виртуальной электростанции и входящие в состав физической модели (§ 4.1 стр. 85).

14. В тексте диссертации имеются погрешности в оформлении, стилистические неточности и другие незначительные недостатки.

## 8. Заключение

Считаю, что диссертация Кечкина Александра Юрьевича «Повышение эффективности электроснабжения энергоудаленных потребителей на основе технологий «виртуальной электростанции» является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной автором единолично. В ней изложены новые научно обоснованные технические решения повышения эффективности децентрализованных систем электроснабжения энергоудаленных потребителей, практическое применение которых будет иметь существенное значение для развития электроэнергетической отрасли России.

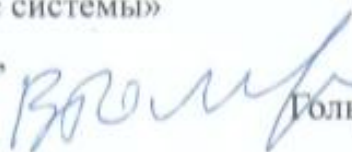
Автор работы – Кечкин Александр Юрьевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы».

### Официальный оппонент

профессор кафедры «Автоматизированные  
электроэнергетические системы»

ФГБОУ ВО «СамГТУ»,

д.т.н., профессор



Гольдштейн Валерий Геннадьевич

Докторская диссертация защищена по специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

Подпись Гольдштейна В.Г. удостоверяю

Ученый секретарь СамГТУ

д.т.н.



Малиновская Юлия Александровна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Адрес: 443100, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Эл.почта: vgg41@yandex.ru

Тел.: 8 (846) 278-44-96