



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ

ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИНЭИ РАН)

117186 г. Москва
ул. Нагорная 31, корп.2
www.eriras.ru

тел. (499) 127-46-64, (499) 123-98-78
факс (499) 123-44-85
E-mail: info@eriras.ru

24.05.2019 № 42-2171/57

На № _____

«УТВЕРЖДАЮ»

Врио директора ИНЭИ РАН,
академик РАН



С.П. Филиппов

2019 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу

ГАБДЕРАХМАНОВОЙ Татьяны Сергеевны

**«Исследование энергетической и экономической эффективности
фотоэлектрических систем микрогенерации в условиях Российской Федерации»**

на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.14.01 – энергетические системы и комплексы

Диссертация Габдерахмановой Татьяны Сергеевны посвящена оценке технико-экономической эффективности систем солнечной микрогенерации, а также поиску и обоснованию районов страны и оптимальных технических решений для практического использования фотоэлектрических систем микрогенерации.

Диссертационная работа изложена на 152 страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения, одного приложения и списка литературы, насчитывающего 138 наименований.

Во **введении** обоснован выбор темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна, практическая значимость, приведены основные защищаемые положения и кратко описана структура работы.

В **первой главе** представлены результаты анализа состояния разработок и практического использования фотоэлектрических систем (ФЭС) микрогенерации в мире. Проанализированы предпосылки и перспективы развития микрогенерации в России с точки зрения особенностей законодательства в области возобновляемой энергетики, ресурсного потенциала, а также особенностей функционирования энергетического рынка в России и формирования тарифов на электроэнергию. Выполнен анализ используемых в мировой практике технических решений, направленных на повышение конкурентоспособности ФЭС микрогенерации. Ставится задача проведения на основе методов физического и математического моделирования сравнительного анализа энергетической и экономической эффективности нескольких схемных решений ФЭС, присоединенных к местной

электрической сети и имеющих в своем составе накопители электрической и тепловой энергии различной емкости. Обсуждается перечень факторов, которые необходимо учесть при моделировании для получения репрезентативных результатов. Обосновывается необходимость проведения экспериментальных исследований динамических характеристик накопителя электрической энергии (НЭЭ) в составе ФЭС. В качестве ключевых энергетических показателей, влияющих на экономическую привлекательность ФЭС микрогенерации, выделяются коэффициенты самопотребления и самодостаточности, характеризующие соответственно долю потребленной на месте генерации энергии и долю покрытия нагрузки за счет локальной генерации.

Вторая глава посвящена обсуждению результатов экспериментальной эксплуатации автономной фотоэлектрической установки (ФЭУ) аккумуляторного типа в условиях Московского региона, направленной на изучение особенностей работы накопителя электрической в ее составе и получение данных о производительности установки и ее компонентов за длительный период времени для верификации имитационной математической модели установки.

Описаны состав экспериментальной установки, методика испытаний, приведены некоторые результаты, полученные в ходе длительной эксплуатации ФЭУ. Экспериментально показано, что при использовании в составе ФЭС свинцово-кислотного накопителя электрической энергии в неблагоприятных климатических и режимных условиях существует риск возникновения разбаланса напряжений на последовательно соединенных ячейках накопителя, что приводит к снижению срока службы НЭЭ. Сформулированы рекомендации, направленные на предотвращению возникновения такого эффекта, заключающиеся в использовании устройств пассивной или активной балансировки заряда НЭЭ.

Приведено описание имитационной модели ФЭУ, созданной в среде моделирования TRNSYS, а также методика и алгоритм моделирования. На основе сопоставления расчетных данных с данными, полученными в ходе экспериментальных исследований, проведена верификация математических моделей ФЭМ и ФЭУ в целом.. Проведен анализ относительной погрешности расчетных значений производительности массива ФЭМ и ФЭУ в сопоставлении с экспериментально измеренными, подтверждающий возможность применения разработанной имитационной модели для исследования ФЭС микрогенерации в других регионах страны в различные сезоны года. Показана достаточная для практических целей точность предсказания интегральных энергетических показателей ФЭУ (погрешность менее 15% при среднесуточных значениях мощности солнечного излучения более 100 Вт/м²).

Третья глава посвящена моделированию производительности ФЭС микрогенерации трех конфигураций – без аккумулирования, с накопителем электрической энергии и накопителем тепловой энергии, а также параметрическим исследованиям указанных систем с учетом ряда параметров, оказывающих принципиальное влияние на репрезентативность результатов моделирования. Моделирование выполнено для пяти перспективных с точки зрения доступных ресурсов солнечной энергии регионов России, относящихся к ценовой (ЦЗ), неценовой (НЗ) тарифным зонам оптового рынка электроэнергии и мощности или к территориям, не объединенным в Единую национальную энергетическую сеть (ИЭ - технологически изолированным энергорайонам России). Рассмотрены Волгоградская и Читинская области, находящиеся в ЦЗ, районы Якутии и Приморского края (НЗ), районы Якутии и Сахалинская область (ИЭ).

Описаны созданные в TRNSYS на основе верифицированной модели экспериментальной ФЭУ имитационные модели рассматриваемых схемных решений.

Приведены исходные параметры моделирования, особенности работы компонентов систем, описаны особенности формирования профилей электрической и нагрузки горячего водоснабжения рассмотренных потенциальных потребителей электрической и тепловой энергии.

Представлены результаты математического моделирования и параметрических исследований на годовом временном интервале с недельным и годовым разрешением. В ходе моделирования для каждого местоположения и схемного решения рассчитывались интегральные показатели энергетической эффективности: годовые средние коэффициенты самопотребления, самодостаточности и покрытия нагрузки ГВС за счет микрогенерации.

Приведена методика и результаты анализа чувствительности показателей энергетической эффективности к нескольким энергетическим и мощностным факторам. Выполнены параметрические исследования в широком диапазоне величин полезной емкости НЭЭ и мощности массива ФЭМ, при этом использовалось несколько вариантов суточных профилей электрических нагрузок, характерных для дома, офисных помещений и школы. Выявлены диапазоны величин удельной установленной мощности ФЭМ и полезной емкости НЭЭ и величины нагрузки ГВС, позволяющие достичь максимального коэффициента самопотребления и доли покрытия электрической и тепловой нагрузки в условиях Волгограда и Якутии.

Четвертая глава посвящена оценке экономической привлекательности анализируемых ФЭС микрогенерации в различных регионах России. Оценка выполнена на основе полученных в главе 3 результатов моделирования производительности систем микрогенерации с использованием метода аннуитета, при этом в качестве основного показателя экономической эффективности ФЭС микрогенерации принята средняя за 20 лет стоимость потребляемой производителем-потребителем электроэнергии.

Рассмотрено несколько сценариев расчета, повышающих репрезентативность результатов. В частности, помимо базового сценария, предполагающего текущие тарифы и розничные цены на оборудование, рассмотрены также сценарий со снижением стоимости ФЭМ и НЭЭ по отношению к текущим на 40%, что справедливо на фоне соответствующих прогнозов ведущих аналитических агентств, а также дополнительный сценарий, предполагающий равенство сбытовых и розничных цен на ЭЭ в ценовых зонах России при текущих ценах на оборудование.

В результате экономического анализа выявлены районы России, схемные решения и диапазоны энергетических и мощностных параметров систем, обеспечивающих экономическую целесообразность владения ФЭМ микрогенерации для каждого из сценариев. В частности, для первого сценария расчета такие схемные решения найдены в некоторых районах НЗ и ИЭ Республики Саха (Якутия); для второго сценария – в неценовых зонах Якутии и неценовых зонах и изолированных энергорайонах юга Дальнего Востока (Владивостоке и Южно-Сахалинске соответственно). Продемонстрирована экономическая привлекательность схемного решения, содержащего водонагреватель при определенных условиях при расчете по первому и второму сценарию.

Результаты оценок не показали экономической целесообразности владения ФЭС микрогенерации в ценовых тарифных зонах России ни при одном из рассмотренных сценариев.

В заключительной части работы представлены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Актуальность диссертационной работы определяется большим интересом в научной среде и в обществе к возобновляемым источникам энергии (ВИЭ), наметившейся тенденцией к развитию в России распределенной генерации, необходимостью решения проблем снижения зависимости от традиционных ископаемых видов топлива и повышения надежности и энергетической эффективности энергоснабжения потребителей, характерных для значительных территорий России, перспективностью развития солнечной энергетики в России ввиду высокого ресурса солнечной энергии в ряде регионов, текущими изменениями в законодательстве России, предполагающими возможность создания и присоединения к сети систем микрогенерации с использованием возобновляемых источников энергии (солнца, ветра, биомассы) непосредственно у потребителя и выдачи произведенной энергии в сеть по определенным тарифам в зависимости от принадлежности к той или иной тарифной зоне.

Научная новизна диссертационного исследования обусловлена, прежде всего, тем, что впервые на основе комплекса экспериментальных и расчетно-теоретических исследований выполнен сравнительный анализ энергетических и экономических характеристик перспективных конфигураций ФЭС микрогенерации и с учетом тарифных особенностей электроэнергетического рынка и климатических условий рассмотренных регионов России оценена их экономическая привлекательность для индивидуальных потребителей.

В рамках выполненного исследования проведены длительные натурные испытания фотоэлектрической установки с электрохимическим накопителем энергии (НЭЭ), обеспечившие возможность получения параметрических данных для последующего создания верифицированных динамических моделей перспективных конфигураций фотоэлектрических систем микрогенерации. На основе выполненных экспериментальных исследований выявлены условия разбалансировки свинцово-кислотной аккумуляторной батареи и сформулированы требования, которые необходимо учитывать при проектировании ФЭС аккумуляторного типа, а также рекомендации по предотвращению преждевременного выхода НЭЭ из строя.

Предложен и реализован оригинальный подход к оценке привлекательности объектов фотоэлектрической микрогенерации с позиций потребителя на основе коэффициентов самопотребления и самодостаточности. Впервые на основе оптимизационных исследований выявлены регионы России, в которых при существующей в стране тарифной политике микрогенерация может быть экономически привлекательной для потребителя. Впервые проанализирована эффективность ФЭС микрогенерации с возможностью использования избытков генерируемой энергии на нужды горячего водоснабжения (вместо выдачи энергии в электрическую сеть) в российских условиях.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в ее непосредственной направленности на теоретическое и экспериментальное обоснование разрабатываемых в настоящее время в стране проектов законодательных и нормативных документов, направленных на развитие микрогенерации на основе ВИЭ, а также рекомендаций и обоснований энергетических и мощностных параметров и состава ФЭС микрогенерации, при которых достигается их наиболее экономически и энергетически эффективная их эксплуатация для потребителя. Результаты диссертации представляют несомненный практический интерес и могут быть использованы российскими компаниями «Хевел», «Солар Системс» и другими, реализующими проекты строительства сетевых и автономных солнечных электростанций и энергоустановок в различных регионах России, а также научными и учебными заведениями, ведущими исследования и разработки в области

солнечной энергетики и осуществляющими подготовку специалистов для этой развивающейся отрасли возобновляемой энергетики (НИУ «Московский энергетический институт», Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого и др.).

Личный вклад автора подтверждается его непосредственным участием в постановке и проведении экспериментальных исследований, в разработке математических моделей исследуемых энергоустановок, в обработке и обобщении результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Апробация работы. Основные положения исследования докладывались на ряде российских и международных конференций и опубликованы в 15 печатных работах, 6 из которых – в научных журналах, входящих в список рекомендованных изданий Высшей аттестационной комиссии при Минобрнауки России, 2 – в журналах, входящих в реферативную базу Scopus.

Замечания по диссертации.

1. Постановка задачи экономического сопоставления вариантов, из-за деления по а) ценовым зонам и б) включению/невключению теплогенерации в состав эффектов, выглядит разрозненной. Полагаем, что для решаемых в работе задач можно было сформулировать общую математическую постановку задачи с последующей ее декомпозицией в зависимости от внешних условий и технических решений.

2. Наряду с принятым автором критерием экономической эффективности - средней за 20 лет стоимости потребляемой просьюмером электроэнергии - было бы целесообразно использовать такие общепринятые показатели экономической эффективности, как ЧДД, LCOE, срок окупаемости. Это дало бы возможность сопоставлять экономическую эффективность рассматриваемых решений с другими вариантами централизованной и распределенной генерации, например, на основе ветровой генерации и т.п.

3. Замечание по представлению полученных результатов. Приведение выработки к 1 МВт·ч (вместо 1 кВт расчетной электрической нагрузки потребителя), на наш взгляд, затрудняет практическое использование построенных диаграмм влияния параметров систем и характера электропотребления (рисунки 3.14, 3.15). Во-первых, по оси абсцисс вместо безразмерной относительной мощности ФЭМ ($\text{кВт}_{\text{пик}}/\text{кВт}$), имеющей понятную физическую интерпретацию, мы видим параметр с размерностью ч^{-1} ($\text{кВт}_{\text{пик}}/\text{МВт}\cdot\text{ч}$). Во-вторых, годовое электропотребление непостоянно в многолетнем разрезе, поскольку зависит от случайных факторов, включая метеорологические. В отличие от годового электропотребления расчетную электрическую нагрузку можно считать величиной детерминированной.

Здесь же отметим, что термин «суммарная годовая электрическая нагрузка», который вводится в разделе 3.3 (формулы 3.4, 3.5), представляется некорректным; по сути изложенного это среднегодовая выработка электроэнергии.

4. В разделе 4 расчетный срок службы НЭЭ на базе свинцово-кислотных аккумуляторов, принятый равным 10 годам, представляется чрезмерно оптимистичным. Ежегодные затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание ФЭМ и накопителей, принятые на уровне 1,5% от инвестиционных затрат, также представляются излишне оптимистичными, особенно для регионов со снежными зимами. В методике оценки эффективности микрогенерации не учтена деградация ФЭМ за срок службы; имеющее место снижение КПД солнечных панелей на 0,5-1%/год при принятом жизненном цикле проекта, равном 20 годам, является существенным

фактором. В связи с этим полагаем, что полученные результаты экономической эффективности микрогенерации следует рассматривать, как достаточно оптимистичные, т.н. "оценки сверху". Для понимания устойчивости полученных результатов представляют интерес также и "оценки снизу". Делались ли автором такие расчетные исследования?

5. Разработанная методика и полученные в работе результаты эффективности микрогенерации на базе ФЭС для разных регионов позволяют сделать оценки а) потенциала их экономически эффективного использования в России и б) спроса на соответствующее оборудование. Включение в диссертационную работу таких оценок, хотя бы укрупненных, существенно усилило бы практическую значимость выполненных исследований.

Указанные замечания не снижают научную и практическую значимость работы. Диссертационное исследование выполнено на актуальную тему, посвящено решению актуальной научно-технической задачи. Исследование выполнено на достаточно высоком научном уровне, сочетает экспериментальные и расчетные исследования, расчеты выполнены с использованием актуальной исходной информации. Результаты, полученные соискателем и изложенные в диссертации, представляют несомненную ценность для широкого круга организаций, ведущих исследования и разработки и подготовку специалистов в области возобновляемой энергетики.

Общее заключение по работе

Диссертация Габдерахмановой Татьяны Сергеевны представляет собой законченную научно-квалификационную работу, соответствующую всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г., а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.01 – энергетические системы и комплексы.

Отзыв на диссертацию Габдерахмановой Т.С. обсужден и утвержден на заседании Ученого Совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт энергетических исследований Российской академии наук, протокол № 5 от 22 мая 2019 г.

Ведущий научный сотрудник
Отдела взаимосвязи энергетики с экономикой
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Институт энергетических исследований
Российской академии наук,
кандидат технических наук
117186, Москва, ул. Нагорная,
д.31, корп.2, (499) 123-05-01, inei1985@mail.ru

Дильман
Марина Давидовна

Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки
Институт энергетических исследований
Российской академии наук (ИНЭИ РАН)
117186, г. Москва, ул. Нагорная, д. 31. корп.2
E-mail: info@eriras.ru
Телефон: 8 (499) 127-46-64, 8 (499) 123-98-78

