На правах рукописи

Дмитриенко Виталий Николаевич

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ И СОСТАВА ФОТО-ДИЗЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ СЕВЕРНЫХ ПОСЕЛКОВ

Специальность 05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск –2018

Работа выполнена в отделении электроэнергетики и электротехники инженерной школы энергетики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Лукутин Борис Владимирович

Официальные оппоненты: **Манусов Вадим Зиновьевич**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», профессор кафедры «Систем электроснабжения предприятий»

Карамов Дмитрий Николаевич
кандидат технических наук,
ФГБУН «Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук», научный сотрудник лаборатории исследования энергетических установок №71, отдела теплосиловых систем №70

Ведущая организация: ФГАОУ ВО Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Защита диссертации состоится 06 декабря 2018 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.269.10 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, ул. Усова, д. 7, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: http://portal.tpu.ru/council/2800/worklist

Автореферат разослан « » октября 2018 г.

Учёный секретарь диссертационного совета Д 212.269.10,
кандидат технических наук: **А.В. Прохоров**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время территория Российской федерации включает огромное количество районов, не имеющих доступа к централизованному электроснабжению. В них входят, прежде всего, труднодоступные территории Сибири и Дальнего Востока. Около 130 подобных локаций общей установленной мощностью 210 МВт находятся в Республике Саха. Децентрализованные системы электроснабжения населенных пунктов обеспечиваются электрической энергией, как правило, с помощью применения дизель-генераторных установок (ДГУ) различных установленных мощностей. Объединение ДГУ образует дизельную электростанцию (ДЭС). Для обеспечения бесперебойной и продолжительной работы ДЭС необходимо снабжение станции дизельным топливом (ДТ). Доставка дизельного топлива в удаленные, труднодоступные районы с неразвитой инфраструктурой лимитирована сроками доступности водных путей и зимних автодорог, что имеет огромное влияние на стоимость ископаемых топливных ресурсов, цена которых повышается из года в год. Так, топливная составляющая в тарифе на электрическую энергию может достигать 50-80% от всех затрат.

Явно выраженными проблемами снабжения электрической энергией децентрализованных населенных пунктов являются:

1. Стоимость доставляемого дизельного топлива для ДЭС очень высока (постоянно растет), что приводит к высокой стоимости производимой электроэнергии.
2. Технологическая, территориальная изолированность и, как следствие, отсутствие какой-либо связи с центральной энергосистемой страны.
3. Оборудование эксплуатируется в тяжелых природно-климатических условиях, что становится причиной ускоренного износа электрических сетей и электрооборудования.

4. Значительный износ существующих дизельных электрических станций приводит к повышенному расходу дорогостоящего дизельного топлива, особенно в условиях значительной неравномерности графика нагрузки.

Одним из наиболее эффективных (частичных) решений подобных проблем, в местах обладающих достаточным уровнем солнечного излучения (к которым относится Якутия), является создание гибридных фото-дизельных электроэнергетических систем с использованием фотоэлектрических панелей (ФП), и современных автоматизированных дизельных электростанций. Российский и зарубежный опыт использования подобных систем показывает, что их использование позволяет успешно решать ряд задач:

– ослабление зависимости удаленных населенных пунктов от дорогостоящего привозного топлива;

– частичное замещение выбывающих/реконструируемых мощностей;

– снижение тарифа на электрическую энергию, за счет уменьшения влияния топливной составляющей и отсутствия эксплуатационных затрат на обслуживание фотоэлектрической части комплекса;

– сокращение выбросов углекислого газа и других вредных, канцерогенных веществ, что улучшает экологическую обстановку места установки.

Подобные системы становятся актуальными ввиду, непрерывного роста цены на ДТ, в то время как цена на фотоэлектрические панели постоянно снижается.

Большое количество как российских, так и зарубежных ученых внесли значительный вклад в развитие направления возобновляемой энергетики в мире. Это такие ученые как: Безруких П.П., Воропай Н.И., Елистратов В.В., Николаев В.Г., Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Попель О.С., Соломин С.В., Bernal-Agustin Joze L., Carta J.A, Hina Fathima, Dekker J., Rodolfo Dufo-Lopez, Rauschenbach G., Ranjeva Minna, Salas V. и многие другие. В своих работах ученые предлагают различные подходы к учету непостоянного характера вырабатываемой энергии энергоисточниками на базе ВИЭ, приводят различные критерии их экономической эффективности. Тем не менее, не смотря на большое количество

работ, ряд научных задач связанных с оптимизацией структуры и состава оборудования гибридных фото-дизельных установок и режимов их работы остались не решенными, и требуют более глубокой проработки.

Данная диссертационная работа посвящена исследованию этих вопросов.

Таким образом, научные исследования, посвящённые повышению энергоэффективности децентрализованных электротехнических комплексов с использованием фотоэлектрических систем, своевременны и направлены на решение актуальной хозяйственной задачи.

Объект исследования. Децентрализованные гибридные фото-дизельные электростанции (ФДЭС), включающие в себя фотоэлектрическую и дизельную генерацию. Их функционирование рассматривается, в отдаленных труднодоступных поселках, северных территорий Якутии.

Предмет исследования. Технико-экономические характеристики автономной гибридной ФДЭС – коэффициент использования установленной мощности (КИУМ), себестоимость производства кВт·ч электрической энергии и емкость аккумуляторных батарей (АКБ).

Цель работы. Создать инструмент, позволяющий оптимизировать установленную мощность составных частей гибридной ФДЭС. Получить рекомендации, по выбору схемного решения, состава оборудования и алгоритмов работы автономной гибридной электростанции, с целью достижения наилучших технико-экономических характеристик в условиях Крайнего севера.

Для реализации поставленных целей были реализованы **следующие задачи:**

1. Проанализированы факторы, определяющие технико-экономическую эффективность гибридной системы электроснабжения.
2. Сформированы математические модели элементов гибридной электростанции, и проведен анализ распространённых программных комплексов оптимизации гибридных систем.
3. Верифицирован программный комплекс PVsyst, на основе сравнения основных энергетических показателей реального объекта с расчетными.

4. Создан инструмент оптимизации установленных мощностей гибридных электростанций на основе программного продукта MS Excel, математических моделей элементов ФДЭС и специализированного продукта для проектирования фотоэлектрических установок PVsyst.

5. Разработан алгоритм оптимизации состава гибридной электростанции с учетом требований к продлению срока службы основного генерирующего оборудования, устойчивости автономной ФДЭС.

6. Алгоритм протестирован, путем определения оптимальных установленных мощностей составных частей гибридной ФДЭС с непрерывной дизельной генерацией, на примере п. Батагай.

7. Алгоритм протестирован, путем определения оптимальных технико-экономических характеристик гибридной ФДЭС с отключаемой ДЭС, на примере п. Юнкюр.

8. Получены рекомендации к выбору схемного решения ФДЭС, установленных мощностей ее составных частей, в зависимости от уровня нагрузки, широты местности в условиях Крайнего севера.

Научная новизна.

- Предложено понятие характерных суток, объединяющее уровень инсоляции, выработки электрической энергии, а также нагрузки для ограничения объема расчетов на разумном уровне, без потери информативности.
- Создана математическая модель оптимизации технико-экономических характеристик гибридной электрической станции с учетом распределения нагрузки на каждый дизельный агрегат, и генерацию фотоэлектрической станции (ФЭС) с учетом ограничивающих требований, предъявляемых к ним по условию устойчивости режимов работы.
- Получены рекомендации по выбору схемного решения, определению оптимальных установленных мощностей основного генерирующего оборудования в зависимости от уровня нагрузки и места установки

(широтный фактор) гибридных ФДЭС предназначенных к размещению в северных районах (на примере территории Якутии).

- Предложены алгоритмы определяющие последовательность действий, производимых для поиска оптимальных значений установленных мощностей генерирующего оборудования гибридной ФДЭС с непрерывной дизельной генерацией и с отключаемой ДЭС.

Практическая ценность результатов работы. Методику расчета и оптимизации соотношения установленных мощностей фотоэлектрической и дизельной частей гибридного энергетического комплекса, полученную в ходе исследования, можно использовать при решении реальных задач проектирования подобных объектов, что подтверждается, актом внедрения АО «Сибирский ЭНТЦ» - институт «ТомскТЭП» от 10.09.2015г. Также методология поиска оптимальных технико-экономических характеристик ФДЭС используется в учебном процессе Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета. Это подтверждается актом об использовании результатов кандидатской диссертационной работы в НИ ТПУ.

Личный вклад автора. Основные положения и результаты данной научной работы получены лично автором. Анализ полученных результатов выполнен автором совместно с научным руководителем.

Апробация. Основные положения научной работы докладывались на всероссийских конференциях. XX, XXI Всероссийская научно-техническая конференция. Энергетика: эффективность, надежность, безопасность (Томск, 2014, 2015 гг.). Также на научно-технических советах отделения электроэнергетики и электротехники инженерной школы энергетики.

Публикации. Основные положения и результаты научной работы отражены в 6 публикациях. Из них 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 статья в изданиях, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science, 2 статьи в сборниках докладов всероссийских научно-технических конференций.

Структура и объем. Диссертация, состоит из введения, четырех глав, заключения, одного приложения и списка литературы. Общий объем работы составляет 153 страницы машинописного текста, включая 79 рисунков, 26 таблиц, списка использованной литературы из 72 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении аргументирована актуальность выбранной темы, поставлена цель и определены основные задачи работы, отражены сведения практической ценности, научной значимости, а также апробации и публикации работы. Представлена структура диссертации.

В первой главе отражено современное состояние и перспективы развития фотоэнергетики в мире и России. Отмечается внимание Российского правительства к сетевой фотоэнергетике, в виде вышедшего в свет 28 мая 2013 года постановления №449 «О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности».

Рассмотрено современное состояние вопроса децентрализованных систем электроснабжения в Российской Федерации и место в нем гибридных электростанций построенных на базе дизельной и фотоэлектрической генерации. Отмечаются проблемы децентрализованных систем связанных с необходимостью круглогодичного снабжения их дизельным топливом. Цена дизельного топлива, для многих удаленных районов значительна, ввиду больших транспортных расходов. Отмечается целесообразность строительства гибридных ФДЭС на примере республики Саха (Якутия).

Рассматриваются распространенные расчетные комплексы, предназначенные для оптимизации установленных мощностей гибридных электрических станций, на основе разного рода возобновляемых источников энергии. Анализируются их преимущества и недостатки, определяется наилучший инструмент для решения поставленных задач. Предпочтительным для исследования в данной научной работе является специализированный программный комплекс для расчета

фотоэлектрических систем PVsyst, в связи с тем, что он позволяет получить детальные данные об основных показателях фотоэлектрических станций с частотой дискретизации в 1 час. Также PVsyst учитывает ряд факторов связанных с фотоэлектрическими станциями, которые не учитываются в других расчетных комплексах. Однако PVsyst не позволяет исследовать гибридные электростанции, поэтому является составной частью разработанной компьютерной модели для исследования ФДЭС.

Во второй главе представлены варианты схемного построения гибридных ФДЭС построенных на базе фотоэлектрической и дизельной генерации:

- Раздельная работа дизельной электростанции и фотоэлектростанции (ФЭС) с накопителем электроэнергии (рисунок 1, а);
- Работа ФЭС параллельно с локальной электрической сетью, образованной ДЭС (рисунок 1,б);
- Гибридный вариант, предусматривающий возможность реализации раздельной и совместной работы ФЭС и дизельной электростанции (рисунок 1, в).

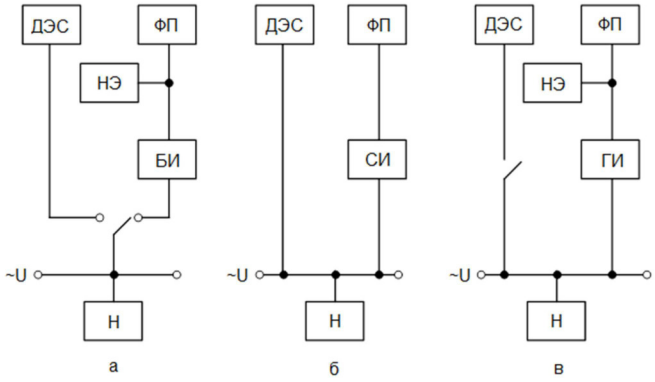


Рис.1. Схемы построения фотодизельных систем электроснабжения

На рисунке 1 обозначены: ФП – фотоэлектрические панели, НЭ – накопитель электрической энергии, Н – нагрузка, U – шина переменного тока, БИ – батарейный инвертор, СИ – сетевой инвертор, ГИ – гибридный инвертор.

Раздельная работа ФЭС и ДЭС (рисунок 1, а) обеспечивает максимальную экономию дизельного топлива, а также продлевает срок службы дизельных

агрегатов, за счет компенсации пиков нагрузки энергией запасённой в накопителях. Данная схема обычно применяется для фото-дизельных энергетических комплексов средней мощности, как правило, ограниченной 100÷120 кВт. Ограничением является стоимость аккумулирующего оборудования, а также необходимая для накопителей инфраструктура.

Вариант параллельной работы ФЭС и ДЭС (рисунок 1, б) предусматривает постоянную работу ДЭС с замещением части дизельной генерации энергией производимой фотоэлектрической станцией. Достоинством данной схемы является возможность максимального использования установленной мощности ФЭС без использования накопителей электроэнергии, и как следствие подобное схемное построение станции является экономически выгодным в отношении капитальных затрат на строительство, по сравнению с другими вариантами. Недостатком является необходимость ограничения мощности сетевого инвертора ФЭС на уровне менее половины текущей мощности генерации дизельного энергетического комплекса.

ФДЭС с гибридным инвертором (рисунок 1, в) позволяет более гибко сочетать достоинства и недостатки схем с батарейными и сетевыми инверторами.

Выбор варианта построения гибридной ФДЭС определяется сезонной и суточной инсоляцией, графиками электропотребления объекта электрификации, а также стоимостью основного генерирующего оборудования и создания необходимой инфраструктуры.

В связи с этим рассмотрены основные факторы, определяющие технико-экономическую эффективность гибридной фото-дизельной электростанции. Такие как: инсоляция и ее временное распределение, объем и временное распределение необходимой электроэнергии, стоимость топлива и динамика ее изменения, влияние стоимости топлива на конечную себестоимость производимой электрической энергии.

Высокая степень интенсивности солнечного излучения в переходные периоды и особенно в летнее время, продолжительность солнечного сияния до 24 часов в сутки в северных районах в течение 1,5 месяцев, значительное количество

децентрализованных локаций, снабжающихся электроэнергией от дизельных электростанций (около 130 подобных локаций общей установленной мощностью 210 МВт), а также постоянный рост цен на дорогостоящее дизельное топливо (рисунок 2), определяет республику Саха (Якутия), как наиболее типичную территорию для анализа размещения гибридных ФДЭС.

На прошедшей в 2015 году конференции в Якутске «Развитие возобновляемой энергетики на Дальнем востоке России», энергоснабжающей организацией ОАО «РАО ЭС Востока» была представлена программа развития проектов ВИЭ в децентрализованных федеральных областях (ДФО). На территории Якутии планируется ввести в эксплуатацию порядка 132 объектов автономной генерации на основе фотоэлектрического преобразования, совокупной установленной мощностью 43,1 МВт.

Рис. 2. Динамика розничных цен на дизельное топливо (руб./л) в России

Вопрос экономической целесообразности играет важную роль в применении источников электрической энергии на основе фото-дизельной генерации. В связи с этим главным экономическим фактором влияющим на развитие проектов гибридных систем, становится стоимость кВт*ч производимой энергии.

Выражение для общих капиталовложений на строительство гибридной ФДЭС при этом имеет следующий вид:

$$K = K_{\text{УСТ}} + K_{\text{ПР}} + K_{\text{СТР}}$$

где, $K_{\text{УСТ}}$ – стоимость комплектного оборудования (руб); $K_{\text{ПР}}$ – стоимость проектных работ (руб); $K_{\text{СТР}}$ – стоимость строительных, монтажных и наладочных работ по установке электростанции (руб);

После ввода проекта в эксплуатацию, новая стоимость складываться из затрат на эксплуатацию и техническое обслуживание объекта генерации. Выражение для общих годовых эксплуатационных затрат имеет вид:

$$C = C_{\text{ЭКС}} + C_{\text{РЕМ}} + C_{\text{ТОП}} + C_{\text{Д.ТОП}}$$

где, $C_{\text{ЭКС}}$ – годовые расходы на эксплуатацию системы электроснабжения (руб); $C_{\text{РЕМ}}$ – годовые расходы на плановый ремонт (руб); $C_{\text{ТОП}}$ – годовые расходы на топливо (руб); $C_{\text{Д.ТОП}}$ – годовые расходы на доставку топлива (руб).

Также во второй главе представлено математическое описание элементов децентрализованных систем электроснабжения с ФДЭС. В зависимости от схемы построения станция состоит из: фотоэлектрических преобразователей (ФЭП); трансформаторов; сетевого либо батарейного инверторов; линий электропередач; аккумуляторных батарей; дизель-генераторных установок; нагрузки.

Фотоэлектрический преобразователь, инверторы. В диссертационной работе моделирование фотоэлектрической части гибридной станции производится в программном продукте PVsyst. Для оценки адекватности итоговых данных фотоэлектрической системы проведена проверка программного продукта PVsyst, путем сравнения расчетных данных с фактическими данными годовой выработки электрической энергии (за 2012 г.) фотоэлектрической станцией п. Ючугей Оймяконского улуса Республики Саха (Якутия) мощностью 20 кВт, полученные от местной электросетевой организации.

В качестве исходных данных по инсоляции для расчета использованы данные солнечного излучения близлежащей к поселку метеостанции Верхоянск. Производилось моделирование станции установленной мощностью 20 кВт на основе поликристаллических панелей, размещенных под углом 45° к горизонту, и ориентированные на юг (аналогично реальному объекту).

Для ограничения объемов вычислений на разумном уровне, в диссертации вводится понятие «характерных суток» для каждого месяца с интервалом дискретизации степени инсоляции в 1 час. Интегральный уровень инсоляции для

рассматриваемого месяца для i-го часа характерных суток вычисляется по формуле:

$$P_{ixc} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^{n} P_{ij}$$

где, P_{ixc} – инсоляция на i-м часе характерных суток; P_{ij} – мощность инсоляции на приемную поверхность на на i-м часе в j-й день месяца; n – количество дней в месяце; i = (0÷23) час суток; j = (1-n) – день месяца.

Суммарная энергия инсоляции за характерные сутки W_{xc}, месяца определяется по выражению:

$$W_{xc} = \sum_{i=0}^{23} P_{ixc}$$

Месячная энергия W_M, соответственно:

$$W_M = n \cdot W_{xc}$$

Сравнение расчетных и фактических объемов выработки электроэнергии рассматриваемой фотоэлектростанции представлено в таблице №1.

Таблица №1. Сравнение выработки электрической энергии ФЭС

	Реальные значения	Расчетные PVsyst	
Месяц	Энергия массива, кВт·ч	Энергия массива, кВт·ч	Относительная разница между реальной выработкой, и расчетной, %
Январь	226	101	55
Февраль	1305	1135	13
Март	2428	3277	35
Апрель	3937	3953	0.4
Май	3058	3609	18
Июнь	2917	3285	13
Июль	2606	3154	21
Август	2542	2548	0.2
Сентябрь	1967	1862	5.3
Октябрь	894	1340	50
Ноябрь	322	389	21
Декабрь	87	0	-
Годовой	22289	24655	10.6

Относительная разница между фактическими и расчетными значениями генерируемой электроэнергии за каждый месяц определяется по формуле:

$$\Delta W_i = \frac{|W_{\Phi i} - W_{\text{p}i}|}{W_{\Phi i}} \cdot 100\%$$

где $W_{\Phi i} - W_{pi}$ – фактическая и расчетная электроэнергия за i-месяц.

Тестирование программного комплекса PVsyst показало, что расчетная погрешность по годовой выработке составляет около 10%, что вполне приемлемо для оценки потенциала возобновляемых энергоисточников.

Аккумуляторные батареи. Нестационарный режим работы ФЭП оправдывает применение АКБ в децентрализованных системах электроснабжения малой мощности. Введение в состав ФДЭС аккумуляторных батарей приводит к значительному увеличению коэффициента использования установленной мощности станции (КИУМ).

Математическая модель АКБ используемая в работе представлена:

Доступной энергией в конце интервала времени:

$$W_{\text{АБ}}^{K} = W_{\text{АБ}}^{\text{н}} + P_{\text{ЭН}} \cdot \Delta t$$

Где, $W_{\text{АБ}}^{\text{н}}$ – внутренняя энергия АКБ в начале интервала;

$P_{\text{ЭН}}$ – знакопеременная функция входной мощности ($P_{\text{ЭН}} > 0$ – заряд АКБ, $P_{\text{ЭН}} \leq 0$ – разряд АКБ); Δt – продолжительность временного интервала.

$$W_{\text{АБ}}^{\text{н}} = E_{\text{АБ}}^{\text{н}} \cdot U_{\text{АБ}}^{\text{н}}$$

Где, $E_{\text{АБ}}^{\text{н}}$ – емкость АКБ в начале интервала Δt; $U_{\text{АБ}}^{\text{н}}$ – напряжение АКБ;

Внутреннее сопротивление АКБ

$$R_{\text{АБ}} = \frac{(U_{\text{АБ}}^{\text{н}})^2}{W_{\text{АБ}}^{\text{н}}}$$

Приведенная модель позволяет определять основные эксплуатационные параметры АКБ.

Дизель-генераторные установки. Дизельная генераторная установка в зависимости от схемы построения гибридной станции является резервным, либо основным источником энергии. При моделировании дизельной установки, в качестве исходных данных используются данные завода изготовителя, данные по существующим агрегатам, либо усредненные данные установок одинаковой мощности различных производителей. В расчетной модели потребление дизельного топлива установками определяется по выражению:

$$B_{\text{ДЭС}} = \sum_{t=1}^{T=1\text{год}} \varphi_{\text{ДЭС}} \cdot W_{\text{ДЭС}}$$

где, $\varphi_{ДЭС}$ – среднее значение (расчетное) потребления топлива ДЭС на производство электрической энергии, г/кВт*ч; $W_{ДЭС}$ - энергия выработанная дизельной составляющей ФДЭС за отсчетный период времени.

Нагрузка. В данной работе в расчетах предполагается использование графиков нагрузки характерных суток с частотой дискретизации один час.

В третьей главе представлены алгоритмы оптимизации структуры и состава ФДЭС, различных схемных решений. Определены основные целевые функции, на основании которых определяются оптимальные установленные мощности составных частей гибридных ФДЭС. Такими функциями для схемы с непрерывной дизельной генерацией являются: максимизация КИУМ и минимизация себестоимости производимой электроэнергии. Для схемы с отключаемой ДЭС: минимизация себестоимости электроэнергии и минимизация совокупной емкости аккумуляторных батарей, требующейся для полноценного использования возможностей фотоэлектрической станции.

КИУМ – коэффициент использования установленной мощности, энергетического оборудования. Определяется как отношение фактической выработки энергии к теоретической, по выражению:

$$\text{КИУМ} = \frac{W}{P_{\text{уст}} \cdot \text{T}}, \%$$

Где, W – объем энергии произведенный составной частью гибридной электростанции (ФЭС, либо ДЭС), за отсчетный период времени, кВт*ч; $P_{уст}$ – установленная мощность составной части гибридного электростанции, кВт; T – отсчетный период времени, ч.

Себестоимость 1 кВт·ч электрической энергии – один из важнейших параметров отражающий целесообразность выбора той или иной мощности составных частей фото-дизельной электростанции. Определяется по формуле:

$$C_{\text{общ}} = \frac{p_{\text{Н.ДЭС}} \cdot K_{\text{ДЭС}} + C_{\text{ДЭС}} + p_{\text{Н.ФЭС}} \cdot K_{\text{ФЭС}} + p_{\text{Н.АКБ}} \cdot K_{\text{АКБ}}}{W}$$

где, $K_{ДЭС}$, $K_{ФЭС}$, $K_{АКБ}$ – капиталовложения на строительство гибридного комплекса состоящего из дизельной, фотоэлектрической электростанций и аккумуляторных батарей; В случае построения системы работающей параллельно с сетью образованной ДЭС (без АКБ) $K_{АКБ} = 0$.

$C_{ДЭС}$ – эксплуатационные затраты на обслуживание дизельной станции. Эксплуатационные расходы на обслуживание фотоэлектрической части гибридной электростанции не учитываются, в силу их относительно малой величины. Эксплуатационные расходы на обслуживание хранилища аккумуляторных батарей также не учитываются, так как в расчетах рассматриваются системы с малым числом герметичных аккумуляторов, практически не требующих обслуживания.

$p_{Н.ДЭС}$, $p_{Н.ФЭС}$, $p_{Н.АКБ}$ – коэффициент рентабельности дизельной, фотоэлектрической электростанций и аккумуляторных батарей.

Оптимизация целевых функций осуществляется с помощью специализированного программного продукта для проектирования фотоэлектрических систем PVsyst и программного комплекса MS Excel на основании алгоритмов последовательности действий. Алгоритм для схемы с непрерывной дизельной генерацией представлен на рисунке 3.

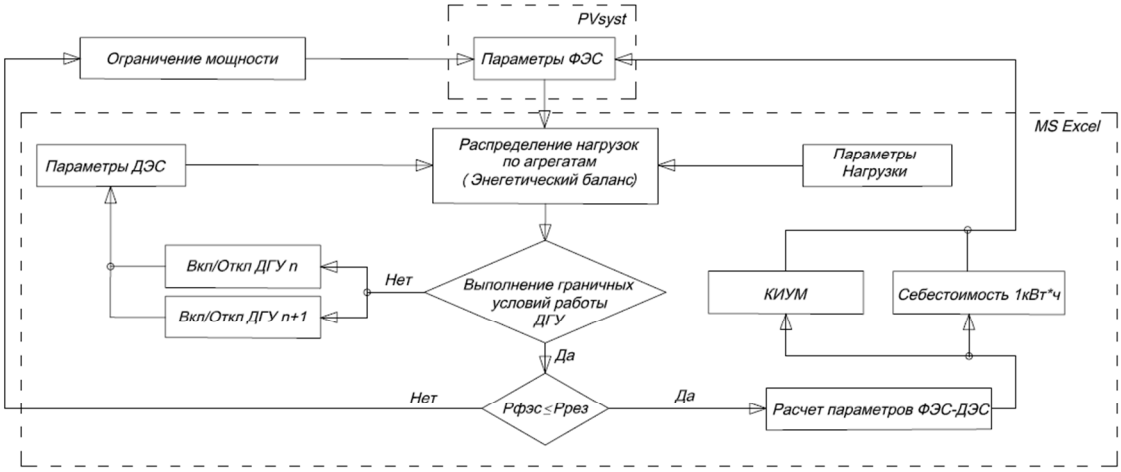


Рис.3 Алгоритм оптимизации установленной мощности ФЭС, работающей параллельно с локальной дизельной системой электроснабжения

Согласно алгоритму, представленному на рисунке 3, в PVsyst заносятся данные фотоэлектрической части гибридной электростанции: количество ФЭП, угол наклона, тип, расстояние между рядами и т.д. На выходе оператор получает почасовые данные выработки электрической энергии ФЭС, за вычетом потерь, которые далее импортируются в MS Excel, и усредняются до характерных суток каждого месяца.

В программную среду MS Excel заносятся почасовые данные графика нагрузок исследуемой местности, которые также сводятся до характерных суток месяца. Заносится информация о составе ДЭС и параметры дизельных агрегатов (установленная мощность, границы загрузки). Производится перераспределение нагрузки, между агрегатами исходя из соблюдения условий продления срока службы дизельных агрегатов и обеспечения надежности работы системы ввиду влияния на энергетический баланс выработки электрической энергии фотоэлектрической составляющей станции. Уровень загрузки дизельной электростанции должен быть таким чтобы, в каждый момент времени остаточная мощность, которую она сможет принять на себя была больше мощности вырабатываемой фотоэлектростанцией ($P_{\text{ФЭС}} \leq P_{\text{рез}}$). Если условия соблюдены, производится расчет значений целевых функций: КИУМ и себестоимость электроэнергии. Полученные значения анализируются оператором, и в случае необходимости исследование повторяется с измененной установленной мощностью ФЭС.

В случае ФДЭС с отключаемой дизель-электрической станцией действия по оптимизации аналогичны вышеприведенному алгоритму, с отличием в области распределения нагрузок по агрегатам (так как схема подразумевает раздельную работу фотоэлектрической и дизельной частей). В случае работы ДЭС производится перераспределение нагрузки, между агрегатами исходя из возможной степени их загрузки. В случае когда $P_{ФЭС}>P_{нагр}$ происходит отключение ДЭС, и нагрузка покрывается за счет солнечной энергии, невостребованная энергия запасается в аккумулятор. При этом в случае, когда

$P_{ФЭС}<P_{нагр}$ вся вырабатываемая ФЭС энергия идет на заряд аккумулятора, и обеспечение нагрузки осуществляется за счет ДЭС. По достижению заданного интервала времени при условии уровня заряда АКБ более 50% от номинальной емкости происходит отключение ДЭС и обеспечение нагрузки запасенной в АКБ энергией. Далее производится расчет значений целевых функций: номинальной емкости АКБ и себестоимости электроэнергии. Полученные значения анализируются оператором, и в случае необходимости исследование повторяется с измененной установленной мощностью ФЭС.

В четвертой главе представлены результаты оптимизации гибридных ФДЭС. С непрерывной дизельной генерацией, на примере п. Батагай и отключаемой ДЭС на примере п. Юнкюр. Поселок Батагай – крупный населенный пункт с населением 3676 человек (на 2017 г.), характеризующийся значительным уровнем нагрузки: $P_{нагр.max}$= 5186кВт (зима), $P_{нагр.min}$= 907кВт (лето). Установленная мощность существующей ДЭС составляет 11МВт. Поселок Юнкюр – мелкий населенный пункт, характеризующийся низким уровнем нагрузки: $P_{нагр.max}$= 110кВт (зима), $P_{нагр.min}$= 26кВт (лето). Установленная мощность существующей ДЭС п. Юнкюр не известна, поэтому в работе определялась на основании обеспечения резервирования, которое достигается обеспечением максимума нагрузки ($P_{нагр.max}$) при выходе из работы двух наиболее мощных генераторов по выражению:

$$\sum_{i=1}^{n}(P_i - 2P_{max}) > P_{\text{нагр}.max}$$

где, n – количество установленных агрегатов ДЭС; P_{max}- агрегаты с наибольшей установленной мощностью; P_i- агрегат с i-й установленной мощностью; $P_{\text{нагр}}$ – максимальная мощность нагрузки.

Для гибридных ФДЭС с непрерывной дизельной генерацией исходя из требований надежности, нагрузка поселка частично должна быть обеспечена за счет электроэнергии, вырабатываемой дизельной станцией, с учетом загрузки отдельных установок. Необходимое значение мощности не является статичным, оно постоянно меняется и зависит от многих факторов.

В зимний период времени изменение производимой мощности ДЭС соответствует изменению инсоляции, что говорит о полном поглощении нагрузкой производимой ФЭС энергии. С увеличением установленной мощности ФЭС, выработка ДЭС в зимнее время уменьшается, что объясняется увеличением вырабатываемой энергии фотоэлектрической составляющей с большей установленной мощностью.

Влияние выработки мощности ФЭС на изменение нагрузки на ДЭС в весенний и летний периоды времени имеют тенденцию к расширению от месяца к месяцу (см. рис. 4), что объясняется астрономическим изменением положения солнца на небосводе и увеличением продолжительности светового дня. Вместе с увеличением продолжительности светового дня увеличивается и приход солнечной радиации на земную поверхность, обуславливая рост энергии производимой фотоэлектрической частью комплекса.

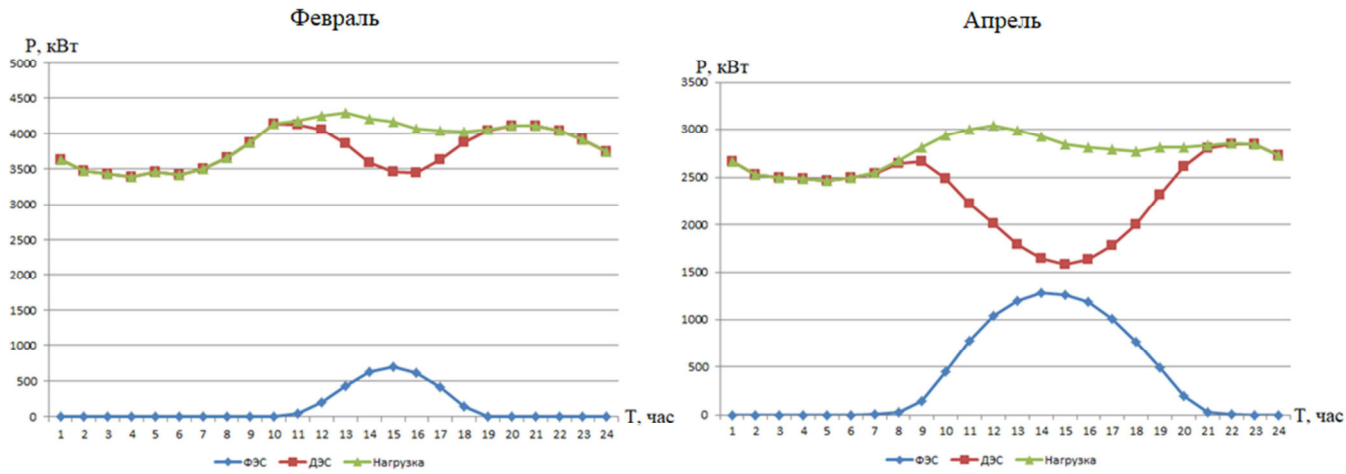


Рис.4 Изменение уровня мощности гибридного комплекса при $P_{ФЭС.уст}$=1,5 МВт

Одновременный рост количества приходящей на земную поверхность солнечной радиации, и снижение уровня нагрузки, приводят к необходимости стабилизации системы путем поддержания энергии производимой ДЭС в заданных приделах, обусловленных лимитированным уровнем загрузки каждого отдельного дизельного генератора. В связи с этим, наблюдается появление избытка энергии продуцируемой ФЭС, относительно требований нагрузки (см. рис. 5).

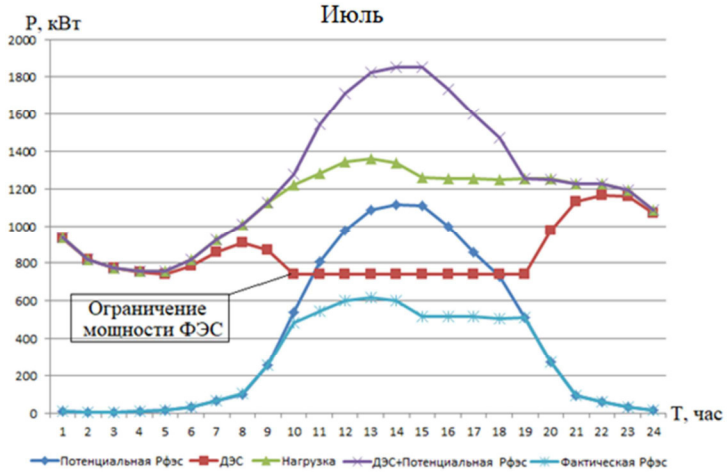


Рис.5 Изменение уровня мощности гибридного комплекса при $P_{ФЭС.уст}$=2 МВт.

Это сопровождается снижением коэффициента использования установленной мощности ФЭС, в часы наибольшей активности солнца (см. рис.6). Недоиспользование возможностей фотоэлектрической станции ведет к увеличению себестоимости производимой энергии ФДЭС и нецелесообразности увеличения мощности выше оптимальных значений.

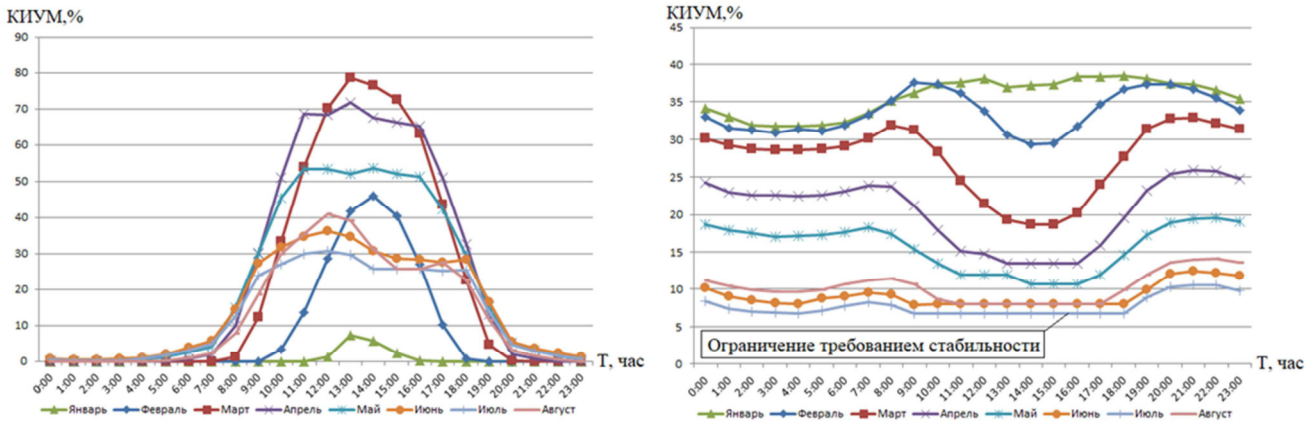


Рис.6 Изменение КИУМ ФЭС (слева) и ДЭС (справа) в течение суток. $P_{ФЭС.уст}$=2 МВт

Алгоритм работы гибридной ФДЭС с раздельной работой составных частей, имеет особенности. При $P_{ФЭС.уст} \leq 2/3\ P_{нагр.max}$ наблюдается ситуация когда $P_{ФЭС} \leq P_{нагр}$, и вся энергия вырабатываемая ФЭС идет только на заряд АКБ. Обеспечение нагрузки происходит только за счет дизельной станции (см. рис. 7, слева). Данная ситуация характерна для зимнего периода работы гибридной электростанции, когда солнечная активность невелика, а также на протяжении всего года при малых установленных мощностях ФЭС.

Накопленный за световой день заряд, предусматривается использовать в ночное и утреннее время следующего дня, когда уровень нагрузки невелик. В этот период времени нагрузка полностью обеспечивается за счет энергии АКБ, дизельная станция на это время отключается. При снижении заряда АКБ до 50-60% от номинальной установленной емкости, включается ДЭС и работает до следующей ночи, пока АКБ не восстановит свой заряд. Ограничение заряда на уровне не ниже 50% требуется для продления срока службы аккумуляторных батарей.

С ростом установленной мощности ФЭС свыше 2/3 $P_{нагр.max}$ все чаще возникает ситуация, когда $P_{ФЭС} > P_{нагр}$, тогда нагрузка обеспечивается энергией солнца, происходит отключение ДЭС, избыточная энергия идет на заряд аккумуляторных батарей. За счет этого в месяцы с наибольшей активностью солнца (апрель-июль) появляется возможность отключения дизельной электростанции более, чем на половину суток (см. рис. 7, справа). Так как в утренние часы нагрузка обеспечивается за счет запасенной в АКБ энергии, с переходом в дневные, когда для этого достаточно энергии от солнца. При этом избыточной энергии солнца хватает для восстановления заряда АКБ до 100% к концу дня.

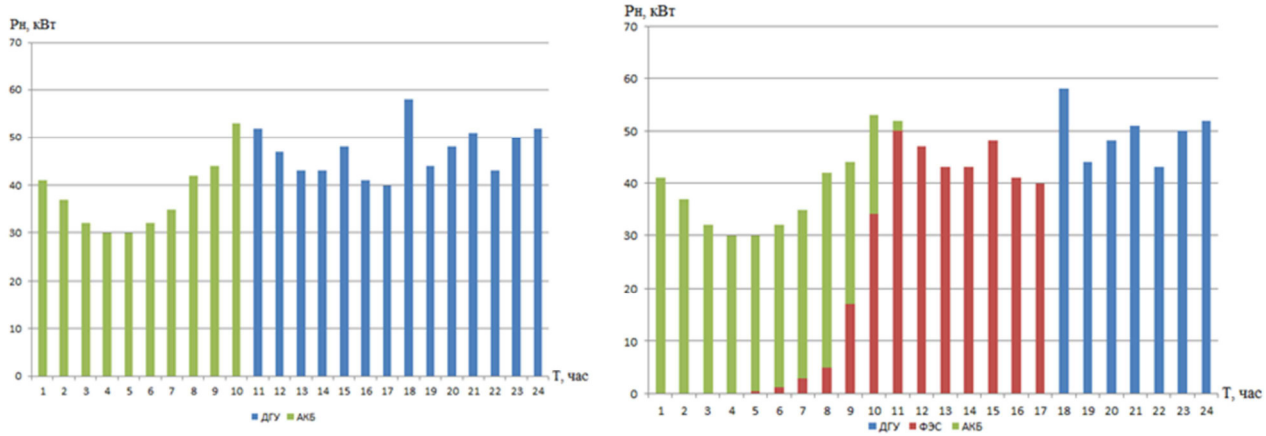
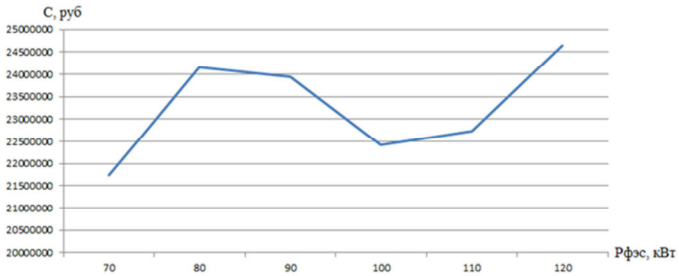


Рис. 7 График обеспечения нагрузки составными частями гибридной электростанции при малых мощностях (слева), значительных мощностях (справа)

В итоге, требуемая емкость аккумуляторных батарей для полноценного использования возможностей ФЭС при $P_{ФЭС.уст} > 2/3\ P_{нагр.max}$ ниже, чем при меньшей установленной мощности ФЭС, а количество энергии произведенной ФЭС и используемой нагрузкой выше. Это объясняется тем, что при низких

установленных мощностях ФЭС всю произведенную энергию требуется сначала аккумулировать, и только потом использовать.

Это влияет на величину капитальных затрат и конечную себестоимость кВт*ч произведенной энергии гибридных ФДЭС (см. рис. 8). Что позволяет определять оптимальные значения целевых функций.



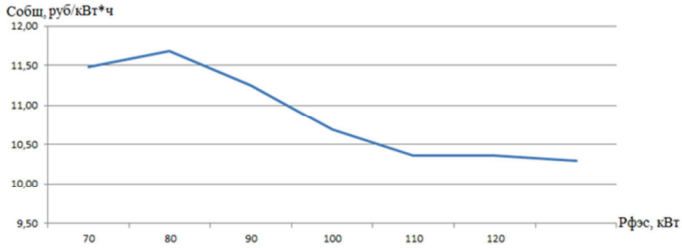


Рис.8 График изменения капитальных затрат (слева) и себестоимости производимой энергии (справа) в зависимости от $P_{ФЭС.уст}$

В заключении представлены основные выводы по научным и практическим результатам, полученным в ходе исследования гибридных фото-дизельных электростанций.

В приложении приведены акт внедрения результатов научно-исследовательской работы в проектной деятельности, и акт использования результатов в учебной работе при подготовке студентов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проанализированы факторы, определяющие технико-экономическую эффективность установки гибридных ФДЭС. В частности, перспективность их строительства на северных территориях. Определено что территория Якутия обладает значительным уровнем инсоляции на всей ее территории. При этом в северных районах (начиная с 66° с.ш.) летом наблюдается полярный день, что увеличивает продуктивность ФДЭС в летнее время по сравнению с южными. Стоимость топлива в Якутии имеет самые большие значения по сравнению с другими территориями России, особенно если учитывать децентрализованные области. Все это говорит о целесообразности применения гибридных ФДЭС в Якутии.

2. Проанализированы распространённые программные комплексы оптимизации гибридных систем. Программный комплекс PVsyst определен, как наилучший инструмент позволяющий определять показатели ФЭС наиболее детально. Для оценки адекватности итоговых данных фотоэлектрических систем проведена верификация программного комплекса PVsyst, на основе сравнения основных энергетических показателей реального объекта с расчетными. Выявлена возможность применения комплекса при расчетах, так как погрешность не превышает 10% в годовом разрезе.
3. PVsyst не решает в полной мере вопроса оптимизации гибридных ФДЭС, поскольку предназначен для проектирования только фотоэлектрических систем. Создан инструмент оптимизации установленных мощностей составных частей гибридной электростанции на основе математических моделей элементов ФДЭС, и программного продукта MS Excel сопряженного с данными получаемыми из специализированного ПО PVsyst.
4. Разработаны алгоритмы работы математической модели оптимизации, с учетом требований к продлению срока службы основного генерирующего оборудования, а также устойчивости фото-дизельной системы, отражающие последовательность действий требуемых для определения оптимальных технико-экономических характеристик ФДЭС различных схемных решений.
5. Проведена оптимизация технико-экономических характеристик ФДЭС с непрерывной дизельной генерацией на основе частного примера в п. Батагай. По итогам анализа определено, что мегаваттные станции, в совокупности с удаленным месторасположением объекта электроснабжения по экономическим соображениям требуют применения ФДЭС с параллельной работой составных частей, без возможности аккумулирования энергии. При этом установленная мощность ФЭС мегаваттных станций на широтах аналогичных п. Батагай должна составлять около 20% от максимального значения нагрузки. При смещении подобной гибридной ФДЭС с непрерывной дизельной генерацией в южные территории Якутии установленная мощность ФЭС может быть увеличена до 30% от максимального значения нагрузки за счет большей

интенсивности солнечного излучения в переходные периоды, когда величина нагрузки значительна.

6. Поиск оптимальных технико-экономических характеристик ФДЭС с отключаемой дизельной составляющей показал, что данное схемное решение целесообразно при уровнях нагрузки примерно до 100÷150 кВт. Рекомендуемая установленная мощность ФЭС при данном схемном решении в северных широтах по экономическим соображениям должна равняться максимальному значению нагрузки.

Основные результаты, опубликованные в изданиях рекомендованных ВАК:

1. Дмитриенко В.Н. Солнечно-дизельные системы электроснабжения северных поселков / В.Н. Дмитриенко, Б.В. Лукутин // Современные проблемы науки и образования. — 2014г. – №3.
2. Дмитриенко В.Н**.** Выбор мощности генерирующего оборудования автономной солнечно-дизельной электростанции мегаваттного класса / В.Н. Дмитриенко, Б.В. Лукутин // Фундаментальные исследования. — 2015. - №4 – С.61 – 66.
3. Дмитриенко В.Н. Методика оценки энергии солнечного излучения для фотоэлектростанции / В.Н. Дмитриенко, Б.В. Лукутин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. — 2017. — Т. 328, № 5. — С. 49-55.

Опубликованные в изданиях индексируемых БД Scopus и Web of Science:

1. **Dmitrienko V.N., Lukutin B.V.** Method for estimating solar radiation energy for photovoltaic plants // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. – 2017. – Volume 328, Issue 5, – [P.49-55].

Опубликованные в изданиях всероссийских конференций:

1. Дмитриенко В. Н. Особенности гибридных децентрализованных солнечно дизельных комплексов мегаваттного класса / В.Н. Дмитриенко, Б.В. Лукутин // XX Всероссийская научно-техническая конференция «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность». — Томск: НИ ТПУ, 2014 — Т. 1. — С. 69-73.

2. Дмитриенко В. Н. Перспективы развития фотоэнергетики в России / В.Н. Дмитриенко, Б.В. Лукутин // XXI Всероссийская научно-техническая конференция
«Энергетика: эффективность, надежность, безопасность». — Томск: НИ ТПУ, 2015 — Т. 1. — С. 64-67.

Личный вклад автора

Вклад автора состоит в следующем: Создание инструмента оптимизации гибридных ФДЭС с использованием детализированных данных (100%). Верификация ПО PVsyst с введением понятия «характерных суток» (50%). Оптимизация гибридных ФДЭС на основе частных примеров (70%).