

На правах рукописи



Кенден Кара-кыс Вадимовна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ПРИНЯТИЯ
РЕШЕНИЙ ПО ВВОДУ МОЩНОСТЕЙ АВТОНОМНЫХ
СОЛНЕЧНО-ДИЗЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК
(НА ПРИМЕРЕ РЕСПУБЛИКИ ТЫВА)**

Специальность: 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент,
Тремясов Владимир Анатольевич

Официальные оппоненты: **Суслов Константин Витальевич**
доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», кафедра «Электроснабжения и электротехники», заведующий кафедрой

Бастрон Андрей Владимирович
кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Красноярский государственный аграрный университет», кафедра «Электроснабжения сельского хозяйства», заведующий кафедрой

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Защита состоится «08» декабря 2021 г. в 16.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.099.07, созданного на базе Сибирского федерального университета, по адресу: 666074, г. Красноярск, ул. Киренского, д.26, ауд. Г21-02.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» по адресу: г. Красноярск, пр. Свободный, д. 79/10 и на сайте: <http://www.sfu-kras.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Сизганова Евгения Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В силу своего географического положения около 60–65 % территории России не охвачены централизованным электроснабжением и характеризуются наличием рассредоточенных потребителей, электроснабжение которых обеспечивается преимущественно от дизельных электростанций (ДЭС). Низкий уровень развития транспортной инфраструктуры и многозвенность процесса завоза топлива обуславливают многократное удорожание электрической энергии. Эксплуатация, как правило, устаревших и физически изношенных децентрализованных источников питания приводит к недостаточной надёжности энергоснабжения и неоправданно высоким финансовым затратам. Поэтому в современной децентрализованной энергетике многофакторность и специфическая сложность проблем выдвигает энергетическую безопасность в ряд наиболее важных составляющих национальной безопасности регионов. Одним из эффективных вариантов совершенствования автономных систем электроснабжения (АСЭС) на сегодняшний день является их построение с ориентацией на местные возобновляемые энергоресурсы. В частности, Республика Тыва отличается высоким солнечным потенциалом и перспективным направлением в развитии изолированных поселков, функционирующих от ДЭС, является применение фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) в составе автономных энергосистем, что позволит снизить топливную составляющую в себестоимости, вырабатываемой электрической энергии и повысить технико-экономическую эффективность.

Поэтому актуальной темой настоящего исследования является совершенствование методов принятия решений по вводу мощностей автономных солнечно-дизельных электростанций (СДУ).

Степень разработанности. Методам оценки решений по вводу мощностей автономных СДУ посвящены работы таких ученых как: В.И. Виссарионов, Н.И. Воропай, В.В. Елистратов, Б.В. Лукутин, С.Г. Обухов, К.В. Сулов, В.А. Тремясов, С.К. Шерьязов, A.Alcayde, AkbarMaleki, R. Banos, C. Gil, J.Gomes, F. Manzano-Agugliaro, F.G. Montoya, D.Suchitra, B. Tushar, R. Utthra, R. Jegadeesan. В работах учёных предложены различные подходы к учёту стохастического характера генерируемой мощности ФЭП, разработаны математические модели элементов СДУ, приведены критерии оценки экономической эффективности использования СДУ в АСЭС. Однако некоторые вопросы с использованием СДУ в АСЭС требуют более тщательной проработки, а именно, недостаточно полно изучены:

– влияние географических и климатических факторов места установки ФЭП, технических и механических характеристик ФЭП на выходные энергетические характеристики ФЭП;

– влияние изменений реальных энергетических характеристик ФЭП и графиков нагрузки потребителей на режимы работы электрогенерирующих элементов СДУ и технико-экономические показатели СДУ;

– учёт комплекса технико-экономических, климатических и экологических критериев при выборе площадки для размещения элементов СДУ.

Объект исследования – солнечно-дизельные установки в составе АСЭС.

Предмет исследования – методы принятия решений по вводу мощностей автономных СДУ.

Цель диссертационной работы – совершенствование методов принятия решений по вводу мощностей СДУ с возможностью учёта изменения реальной величины выработки электрической энергии ФЭП и графиков нагрузки потребителей и подхода к выбору площадки для размещения элементов СДУ, позволяющего учитывать комплекс технико-экономических, климатических и экологических критериев.

Для достижения цели решены следующие задачи:

1. Выполнен анализ параметров, влияющих на реальные выходные энергетические характеристики ФЭП; рассмотрены математические методы оптимизации СДУ и проведён анализ соответствующих программно-вычислительных комплексов (ПВК).

2. Усовершенствована математическая модель ФЭП и создан ПВК для определения выходных энергетических характеристик ФЭП в зависимости от географической широты места расположения ФЭП, времени года и суток.

3. Выполнены оценка интенсивности солнечного излучения и расчёт прогнозируемых значений выходных энергетических характеристик ФЭП в поселках, а также районирование территории Республики Тыва по солнечным зонам.

4. Произведена оценка влияния реальной величины выработки электрической энергии ФЭП и графиков нагрузки потребителей на режимы работы аккумуляторных батарей (АБ) и ДГ.

5. Разработана методика оптимизации структуры и параметров СДУ, учитывающая изменения реальной величины выработки электрической энергии ФЭП и графиков нагрузки потребителей с использованием метода роя частиц. Создан ПВК, реализующий методику оптимизации СДУ для ряда поселков Республики Тыва.

6. Предложена методика принятия решений при выборе площадки для размещения элементов СДУ для изолированного поселка Республики Тыва.

Научная новизна работы и положения, выносимые на защиту:

1. Усовершенствована математическая модель ФЭП, позволяющая получать выходные энергетические характеристики ФЭП с учётом интенсивности солнечного излучения, температуры окружающей среды, технических характеристик и способа ориентации ФЭП в зависимости от географической широты места расположения ФЭП, времени года и суток при отсутствии информации от актинометрических станций. Создан ПВК, реализующий математическую модель ФЭП.

2. Разработана методика оптимизации структуры и параметров СДУ из условия минимальной себестоимости электрической энергии, отличающаяся

возможностью учитывать изменения реальной величины выработки электрической энергии ФЭП и графиков нагрузки потребителей, и создан ПВК, осуществляющий поиск оптимального соотношения генерирующих мощностей, выбора оптимального единичного типоразмера оборудования.

3. Предложена методика принятия решения при выборе площадки для размещения элементов СДУ, учитывающая комплекс технико-экономических, климатических и экологических критериев с использованием теории многокритериальной оптимизации и метода экспертных оценок.

Практическая значимость работы. На основе усовершенствованной модели ФЭП и разработанной методики оптимизации структуры и параметров СДУ для удобства пользования и повышения эффективности выполнения расчетов созданы ПВК для проведения исследований выходных параметров ФЭП и оптимизации СДУ в АСЭС при проектировании.

Результаты диссертационной работы использованы в деятельности Министерства топлива и энергетики Республики Тыва.

Материалы диссертационной работы внедрены в учебный процесс кафедры «Общеинженерные дисциплины» ФГБОУ ВО «Тувинский государственный университет» при проведении занятий по курсу «Возобновляемые источники энергии».

Методы исследования. В процессе выполнения исследований использовались вероятностно-статистические методы анализа данных, теория исследования операций, теория принятия решений, методы оценки экономической эффективности технических решений, математические методы оптимизации, методы экспертных оценок.

Степень достоверности результатов подтверждается корректностью использования методов и моделей, а также удовлетворительной сходимостью оценок, с результатами, полученными другими авторами при решении аналогичных задач.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международном научно-практическом форуме «Природные ресурсы и экология Дальневосточного региона», Хабаровск, 2012 г.; на Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов», Благовещенск, 2013 г., 2015 г., 2019 г.; на XIX Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: эффективность, надежность, безопасность», Томск, 2013 г., 2018 г., на Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Актуальные вопросы энергетики», Омск, 2018 г.; на Всероссийской научной конференции с международным участием и XI научной молодежной школы «Возобновляемые источники энергии», Москва, 2018 г.; на ежегодной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов Тувинского государственного университета, Кызыл, 2012 г., 2017 г., 2019 г.

Диссертантом выполнен грант Главы–Председателя Правительства Республики Тыва для поддержки молодых ученых в 2016–2017 гг. по теме «Децентрализованное энергоснабжение районов Республики Тыва с использованием возобновляемых источников энергии».

Диссертант также участвовал в выполнении научно-исследовательских работ в рамках долгосрочной целевой программы «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности в Красноярском крае» на 2010–2012 годы и на период до 2020 года».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 33 печатных работы, в том числе 4 работы в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ для опубликования результатов диссертационных исследований, 1 монография, 15 работ – в трудах международных и всероссийских научно-технических конференций, 10 работ в других изданиях. Получены 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. В каждой работе, опубликованной в соавторстве, личный вклад автора составляет не менее 50 %.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и 5 приложений. Объем диссертационного исследования составляет 117 страниц машинописного текста, в данный объем входят 94 страниц основного текста, содержащего 30 рисунков, 14 таблиц, список использованных источников состоит из 125 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, приведены основные результаты, составляющие предмет научной новизны, практическая значимость работы и личный вклад автора, приведена структура диссертации.

В первой главе представлены особенности и пути совершенствования АСЭС на примере Республики Тыва: характеристики ДЭС, удельная установленная мощность на одного человека, годовое потребление дизельного топлива и выработка электрической энергии. Анализ местных возобновляемых энергоресурсов на территории Тывы позволил обосновать возможность использования в АСЭС ФЭП совместно с накопителями энергии.

Приведено описание структурной схемы и элементной базы СДУ. Обзор математических методов для решения оптимизационных задач показал, что для СДУ наиболее приемлемым является метод роя частиц. По результатам анализа имеющихся методов для исследования СДУ обоснована необходимость совершенствования математической модели ФЭП, разработки методики оптимизации структуры и параметров СДУ.

Во второй главе усовершенствована математическая модель ФЭП, позволяющая определять выходные энергетические характеристики ФЭП в зависимости от географических и климатических факторов места установки

ФЭП, технических характеристик ФЭП. Модель ФЭП была реализована в программной среде имитационного моделирования Delphi 7.

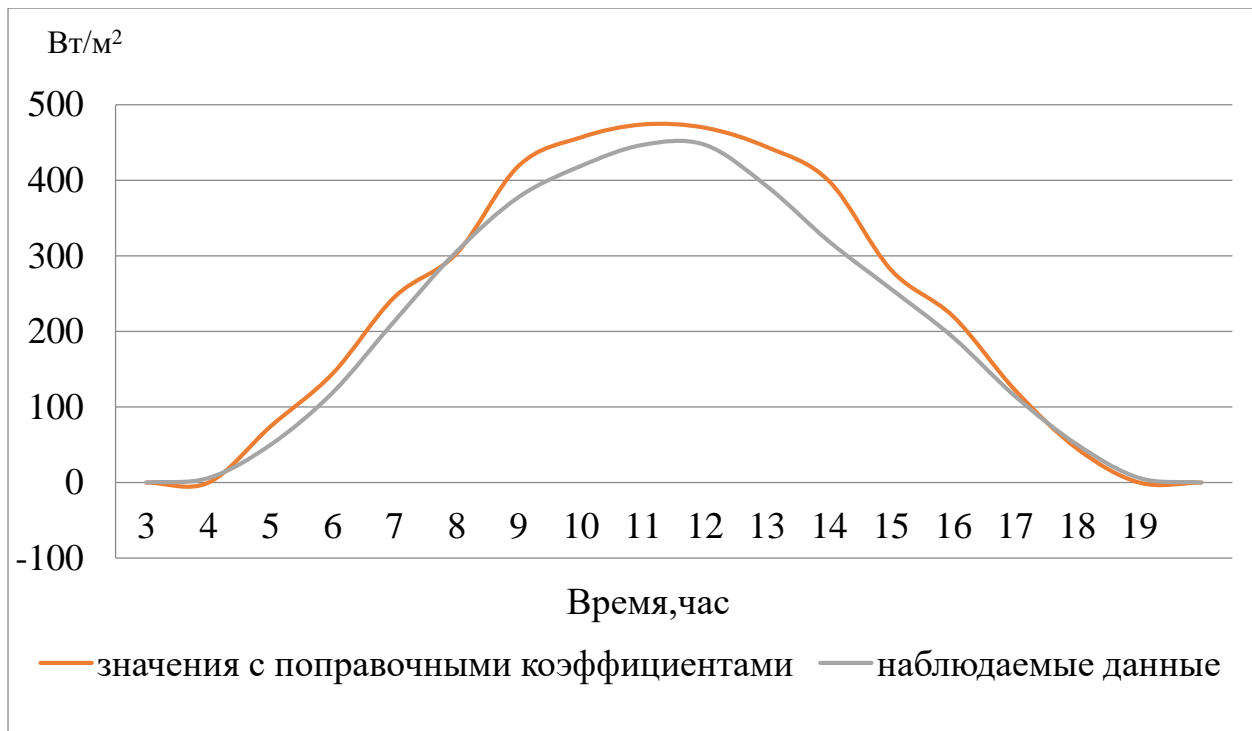
Для условий Республики Тыва проанализирована возможность использования различных методик оценки интенсивности солнечного излучения, учитывающих процессы поглощения и рассеяния излучения в зависимости от исходных данных. Сравнительный анализ позволил за основу выбрать метод Берда для оценки интенсивности солнечного излучения в местах установки СДУ. Интенсивность солнечного излучения $E_{гор}^{полн}$, Вт/м² на горизонтальную поверхность:

$$\begin{aligned} E_{гор}^{полн} &= \frac{E_{гор}^{пр} + E_{гор}^{диф}}{1 - r_3 \cdot r_a}, \\ E_{гор}^{пр} &= E \cdot \cos\theta \cdot k_{пр}, \\ E_{гор}^{диф} &= \frac{1}{3} (E - E_{гор}^{пр}) \cdot \sin\theta \cdot k_{диф}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $E_{гор}^{пр}$, $E_{гор}^{диф}$ – интенсивность прямого и диффузного СИ, Вт/м²; E – интенсивность солнечного излучения, проходящего на верхнюю границу атмосферы, Вт/м²; r_3 , r_a – значения альбедо подстилающей поверхности и атмосферы; θ – зенитный угол Солнца, град.; $k_{пр}$, $k_{диф}$ – вводимые поправочные коэффициенты прямого и диффузного солнечного излучения.

На рисунке 1 представлены наблюдаемые данные по изменению сумм интенсивности прямого и диффузного солнечных излучений на горизонтальную поверхность с актинометрической станции, расположенной в г. Кызыл 15 июля 2020 г. и значения, полученные расчетным путем с вводимыми поправочными коэффициентами. Сопоставление расчетных значений интенсивности солнечного излучения с наблюдаемыми данными актинометрической станции показало удовлетворительную сходимость с погрешностью, не превышающей 10–15 %.

Максимальная мощность, которую способна генерировать ФЭП в реальных условиях, варьируется в пределах от 0 до 120 % её пиковой мощности, указанной в технических характеристиках ФЭП при Standard Test Conditions (STC) ФЭП. Анализ работ, посвящённых оценке параметров ФЭП, показал, что на реальное значение выработки электроэнергии ФЭП, прежде всего, влияет интенсивность СИ, температура окружающей среды, технические характеристики ФЭП и способ ориентации ФЭП.



а)



б)

Рисунок 1 – Изменение сумм интенсивности солнечного излучения на горизонтальную поверхность для актинометрической станции в г. Кызыле 15 июля 2020 г.:

а) прямое солнечное излучение б) диффузное солнечное излучение

Предложенная математическая модель ФЭП, позволяющая учитывать перечисленные выше параметры, в общем виде представлена следующей системой выражений:

$$\left\{ \begin{array}{l} E_{\text{след}}^{\text{полн}} = \frac{E_{\text{гор}}^{\text{пр}}}{\text{Cos}\theta} + E_{\text{гор}}^{\text{диф}} \frac{(1+\text{Cos}\theta)}{2} + E_{\text{гор}}^{\text{полн}} \frac{(1-\text{Cos}\theta)}{2}; \\ E_{\text{накл}}^{\text{полн}} = E_{\text{гор}}^{\text{пр}} \frac{\text{Cos}\xi}{\text{Cos}\theta} + E_{\text{гор}}^{\text{диф}} \frac{(1+\text{Cos}\beta)}{2} + E_{\text{гор}}^{\text{полн}} \frac{(1-\text{Cos}\beta)}{2}; \\ I^{\Phi} = \frac{E^{\text{полн}}}{E^{\text{STC}}} \cdot (I_{\text{КЗ}}^{\text{STC}} + k_I \cdot (T - T^{\text{STC}})); \\ I^0 = \frac{I_{\text{КЗ}}^{\text{STC}} + k_I \cdot (T - T^{\text{STC}})}{\exp\left(\frac{U_{\text{XX}}^{\text{STC}} + k_U \cdot (T - T^{\text{STC}})}{U^T}\right) - 1}; \\ I = I^{\Phi} - I^0; \\ U = U_{\text{XX}}^{\text{STC}} - 0,445112 \cdot I^{\Phi} - U^T \cdot \ln\left(1 + \frac{U_{\text{MM}}^{\text{STC}}}{U^T}\right); \end{array} \right. \quad (2)$$

где E^{STC} – интенсивность полного солнечного излучения при STC, Вт/м²; $E_{\text{накл}}^{\text{полн}}$ – интенсивность полного солнечного излучения на наклонную поверхность, Вт/м²; $E_{\text{след}}^{\text{полн}}$ – интенсивность полного солнечного излучения для следящей за Солнцем поверхности, Вт/м²; $E^{\text{полн}}$ – интенсивность полного солнечного излучения на выбранную поверхность, Вт/м²; β – угол наклона поверхности, град.; ξ – угол падения лучей на наклонную поверхность, град.; T^{STC} – температура при STC, °C; T – температура окружающей среды, °C; $I_{\text{КЗ}}^{\text{STC}}$ – ток КЗ ФЭП при STC, А; I^{Φ} – фотоэлектрический ток, А; I^0 – обратный ток насыщения ФЭП, А; $U_{\text{XX}}^{\text{STC}}$ – напряжение ХХ ФЭП при STC, В; U^T – температурное напряжение, В; k_U, k_I – температурные коэффициенты тока и напряжения; I – реальный ток ФЭП, А; U – реальное напряжение ФЭП, В.

В качестве допущений в модели ФЭП принято, что спектральная чувствительность ФЭП и внутренние потери энергии, связанные с возможным затенением ФЭП или их частей, не учитываются.

Выходная расчетная мощность ФЭП в точке максимальной мощности при STC отличается на величину не более $\pm 1,5$ % от значений мощности завода-изготовителя. Аналогичная точность получена и при определении тока короткого замыкания и напряжения холостого хода. Сравнение полученных вольтамперных ФЭП характеристик с данными завода-изготовителя свидетельствуют о достаточно высокой точности моделирования. Модель ФЭП реализована в программной среде имитационного моделирования Delphi 7. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

В третьей главе представлены методика оптимизации структуры и параметров СДУ, учитывающая изменения реальных энергетических характеристик ФЭП, графиков нагрузки потребителей и осуществляющая поиск оптимального соотношения генерирующих мощностей, выбор оптимального единичного типоразмера оборудования; методика принятия решений при

выборе площадки для размещения элементов СДУ с использованием теории многокритерийной оптимизации и метода экспертных оценок.

В качестве целевой функции СДУ принят критерий минимума себестоимости электрической энергии, учитывающий выработку электрической энергии ФЭП при различных режимах функционирования СДУ, руб./кВт·ч:

$$C_{\text{СДУ}} = \frac{(W_{\text{общ}} - W_{\text{ФЭП}}) \cdot C_{\text{ДЭС}} + W_{\text{ФЭП}} \cdot C_{\text{ФЭП}}}{W_{\text{общ}}} \rightarrow \min, \quad (3)$$

где $C_{\text{ДЭС}}$ – себестоимость электрической энергии, генерируемой ДЭС, руб./кВт·ч.; $C_{\text{ФЭП}}$ – себестоимость электрической энергии, производимой ФЭП, руб./кВт·ч.; $W_{\text{общ}}$ – общее годовое потребление электрической энергии поселком, кВт·час; $W_{\text{ФЭП}}$ – выработка электрической энергии ФЭП, кВт·час.

В задаче оптимизации требуется выбрать структуру и параметры СДУ, в которой независимыми оптимизируемыми переменными выступают общие установленные мощности ФЭП и ДГ (или число ФЭП/ДГ заданного типоразмера) и емкость АБ (или число АБ заданного типоразмера).

На оптимизируемые параметры СДУ накладываются следующие ограничения:

$$\begin{aligned} P_{\text{ДГ}} &\geq P_{\text{max}}^3, n_{\text{ДГ}} \geq 2, \\ W_{\text{АБ}} &\geq W_{\text{ФЭП}}^{\text{Л}} - W_{\text{П}}^{\text{Л}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где P_{max}^3 – максимальное значение нагрузки потребителей в зимнее время, кВт; $P_{\text{ДГ}}$ – общая установленная мощность ДГ, кВт; $n_{\text{ДГ}}$ – количество ДГ, шт; $W_{\text{ФЭП}}^{\text{Л}}$ – суточная выработка электроэнергии ФЭП в летнее время, кВт·ч; $W_{\text{П}}^{\text{Л}}$ – суточное потребление электроэнергии нагрузкой потребителей в летнее время, кВт·ч; $W_{\text{АБ}}$ – общая запасенная электроэнергия всеми АБ, кВт·ч.

Выбор общей установленной мощности ФЭП по максимуму нагрузки в зимний период является неоправданным, т.к. выработка ФЭП в этот период будет минимальной, что повлечёт большие расходы на установку ФЭП большой мощности. Анализ баланса потребляемой и генерируемой ФЭП электрической энергии показал, что эти значения наиболее близки друг другу с марта по октябрь. Поэтому общую установленную мощность ФЭП выбирают исходя из усредненных графиков нагрузок потребителей в заданные месяцы.

Процедура использования метода роя частиц для решения задачи оптимизации СДУ включает следующие шаги обновления:

1. Вычисляются значения целевой функции, полученные в результате итераций из обновления каждой переменной СДУ с учётом своей текущей позиции X_i по выражению:

$$x_{id}^{(k+1)} = x_{id}^k + u_{id}^{(k+1)}, \quad (5)$$

2. Скорость переменных на итерации обновляется с помощью выражения:

$$u_{id}^{(k+1)} = \omega u_{id}^{(k)} + \varphi_1 \cdot \alpha_1^{(k)} \cdot (pb_{id}^{(k)} - x_{id}^{(k)}) + \varphi_2 \cdot \alpha_2^{(k)} \cdot (gb_{id}^{(k)} - x_{id}^{(k)}), \quad (6)$$

где φ_1, φ_2 – коэффициенты ускорения; α_1, α_2 – однородно распределенные случайные числа в диапазоне $[0;1]$; $pb_{id}^{(k)}$ – наилучшие позиции каждой переменной, соответствующей минимуму в значениях целевой функции; $gb_{id}^{(k)}$ – наилучшая глобальная позиция для всех переменных СДУ, соответствующей минимуму в значениях целевой функции.

Разработанная структурная схема методики оптимизации СДУ представлена на рисунке 2. Для проведения оптимизационных исследований методика была реализована в программной среде MATLAB. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

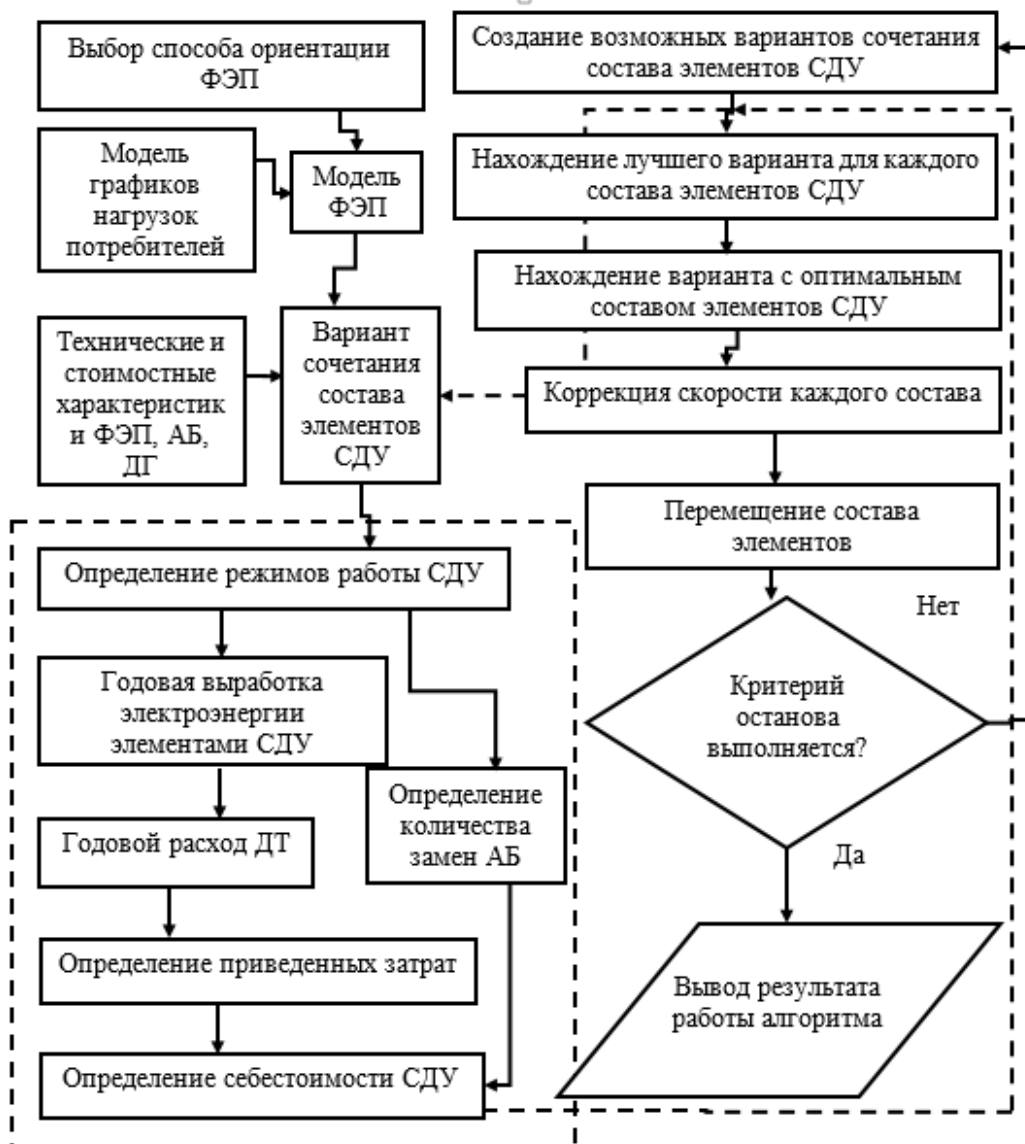


Рисунок 2 – Структурная схема методики оптимизации СДУ

Выбор площадки для размещения элементов СДУ является важным стратегическим решением на этапе строительства и эксплуатации СДУ. Поэтому процесс выбора площадки для размещения элементов СДУ состоит из рассмотрения потенциальных противоречивых критериев и анализа нескольких возможных вариантов. При этом понимая важность решения этого вопроса, лица, принимающие решения (ЛПР), должны выбрать площадку, не только подходящую для нынешних условий, но и достаточно гибкую в процессе модернизации СДУ.

Для решения задачи принятия решений при выборе площадки размещения элементов СДУ выбран многокритериальный подход, основанный на экспертной оценке. Многокритериальный подход заключается в свертке всех критериальных свойств (КС) в единый (комплексный критерий эффективности).

Для многокритериальной оценки применяются различные формы свертки: средняя арифметическая $F_{\text{ср.А}}^*$, средняя гармоническая F_{Γ}^* , и др.

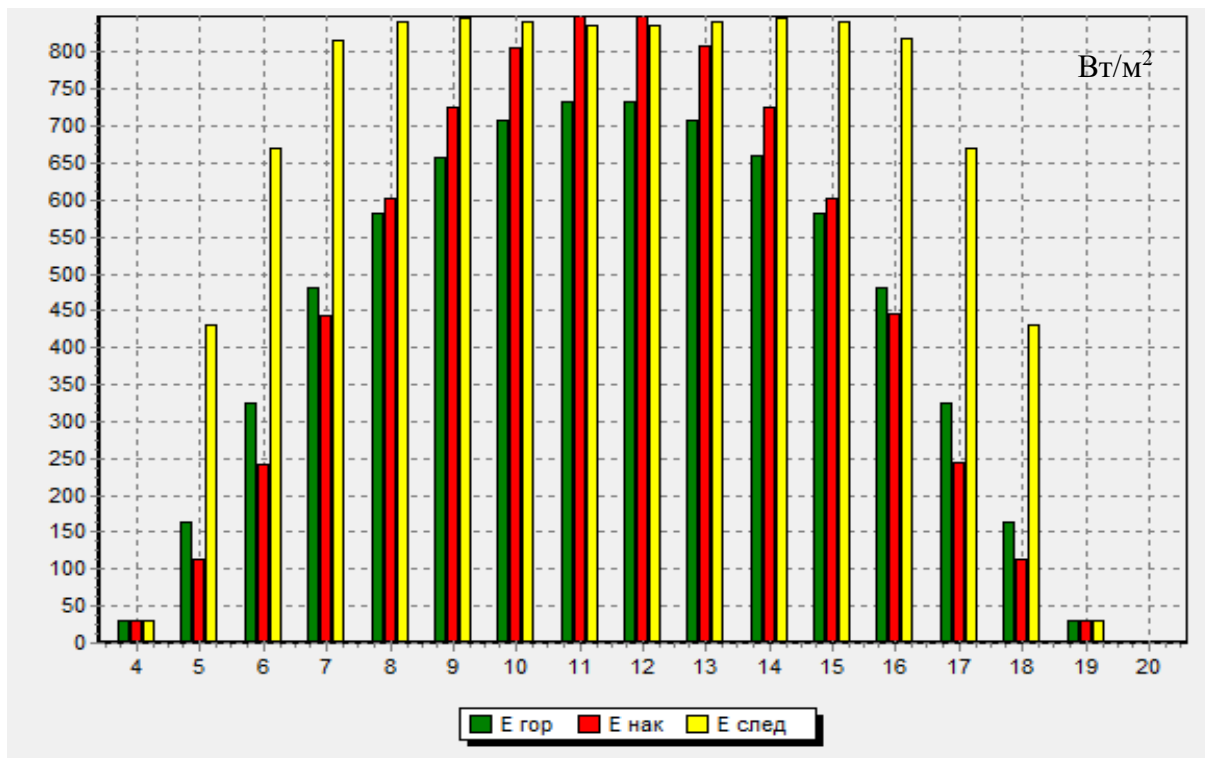
$$F_{\text{ср.А}}^* = \sum_{i=1}^n v_i e_{ij} \text{ при } \sum_{i=1}^n v_i = 1; \quad (7)$$

$$F_{\Gamma}^* = \left(\sum_{i=1}^n \frac{v_i}{e_{ij}} \right)^{-1} \sum_{i=1}^n v_i = 1; \quad (8)$$

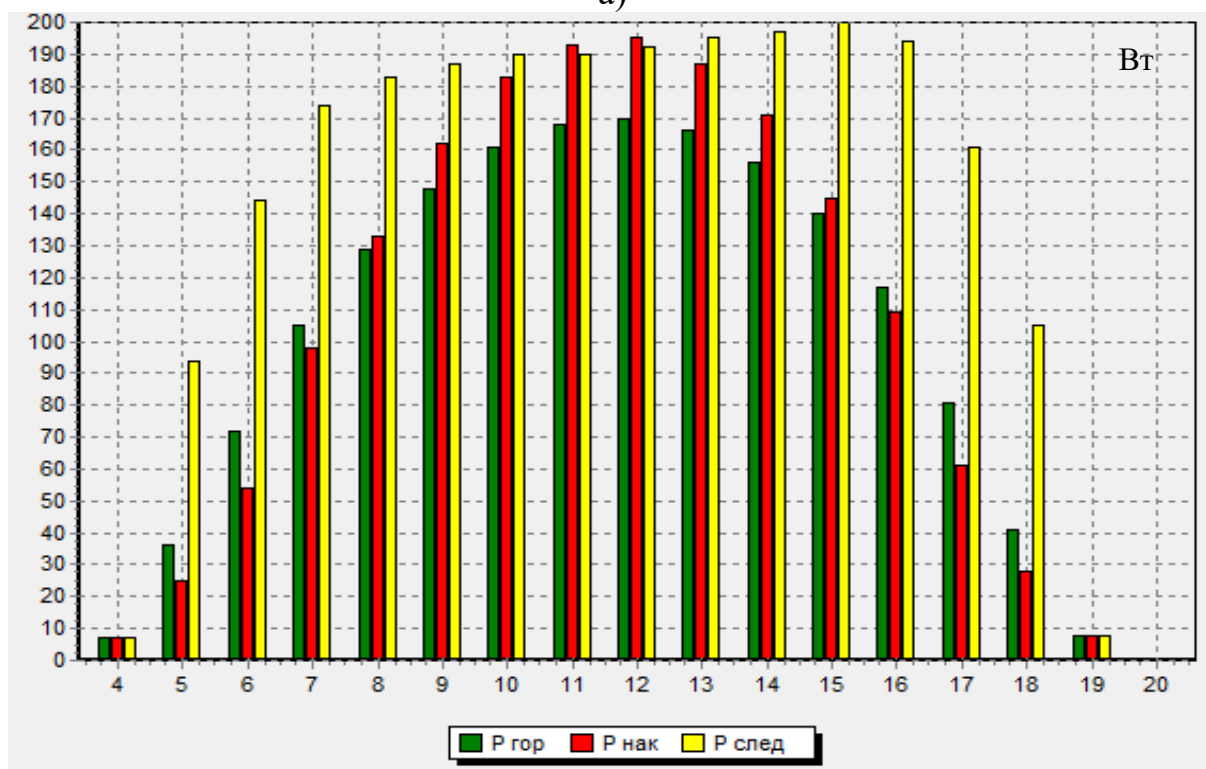
где F^* – оценочный функционал, представленный единым комплексным (скалярным) критерием; e_{ij} – оценка i -го частного КС в j -м варианте; n – число частных КС; v_i – весомость частного КС. У оптимального варианта F^* значения должны быть наибольшими из всей совокупности вариантов.

В четвертой главе произведено районирование территории Республики Тыва по солнечным зонам; рассчитаны прогнозируемые значения изменений интенсивности солнечного излучения и выходные энергетические характеристики ФЭП «SilaSolar 200 Вт» при различных способах ориентации ФЭП для изолированного поселка Республики Тыва. На примере двух поселков республики представлены практические результаты оптимального выбора параметров и структуры СДУ, произведен выбор площадки для размещения элементов СДУ для изолированного поселка Республики Тыва.

В качестве примера рассмотрен поселок Качык с географическими координатами 96.4237925 В.Д. и 49.9369615 С.Ш. Значения температуры окружающей среды получены с ближайшей метеостанции № 3607 «Эрзин». Ввиду отсутствия актинометрической станции для этого поселка рассчитаны по разработанной методике прогнозируемые значения изменений интенсивности СИ и мощности ФЭП «SilaSolar 200 Вт» для 15-ого июля при различных способах ориентации ФЭП (рис. 3).



а)



б)

Рисунок 3 – Прогнозируемые значения параметров на различные поверхности в п. Качык для 15-ого июля:
 а) изменений интенсивности солнечного излучения;
 б) мощности ФЭП «SilaSolar 200 Вт»

На примере поселка Кызыл-Хая представлены результаты оптимизации структуры и параметров СДУ. В поселке Кызыл-Хая функционируют два ДГ с установленными мощностями 100 и 200 кВт. Общая численность населения на 01.01.2020 г. составила 1341 человек. Максимум нагрузки в зимнее время равен 170 кВт. Потребление дизельного топлива за 2020 г. составило в среднем 120 тонн; годовая выработка электрической энергии – 388 МВт·ч, при этом себестоимость электрической энергии от ДЭС равна 46,32 руб./кВт·ч.

Ввиду высокой стоимости систем слежения за Солнцем и с целью повышения эффективности использования ФЭП при оптимизации структуры и параметров СДУ для этого поселка выбран наклонный способ ориентации ФЭП, ориентированной строго на юг.

В результате оптимизации структуры и параметров СДУ в поселке Кызыл-Хая получены следующие структура и параметры элементов СДУ, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Оптимальные структура, параметры элементов СДУ п. Кызыл-Хая

Элементы СДУ	ФЭП	АБ	ДГ
Тип элемента	DELTA BST 300-24M DUO	GX12-230	АД180-Т400
Количество элементов, шт.	413	658	2
Мощность/Емкость АБ, кВт/кА·час	124	151	360

Сравнение технико-экономических показателей существующей ДЭС с полученной в результате оптимизации структурой и параметрами СДУ в п. Кызыл-Хая, представленными в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты оптимизации структуры и параметров СДУ в п. Кызыл-Хая

Вариант	Суммарные установленные мощности (емкость) элементов, кВт (кА·час)			Годовая выработка электроэнергии, МВт	Годовой расход топлива, тонн	Себестоимость электрической энергии, руб./кВт
	ФЭП	АБ	ДГ			
ДЭС	-	-	300	388	120	46,32
СДУ	124	151	360		63,6	32,21

Технико-экономические показатели полученной структуры и параметров СДУ в Кызыл-Хая представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Техничко-экономические показатели для оптимальной структуры СДУ п. Кызыл-Хая

Показатели	Значение
Капитальные затраты, тыс. руб.	36180
Ежегодные издержки, тыс. руб.	1596
Денежный эквивалент «вытесненному» топливу, тыс. руб.	2555,95

Использование СДУ в АСЭС поселке Кызыл-Хая дает возможность снизить потребление дизельного топлива на 47 %.

Поселок Кунгуртут имеет общую численность населения 1505 человек (на 01.01.2020 г.), в котором функционируют три ДГ с установленными мощностями 100, 200 и 400 кВт. ДЭС работает с 6 утра до 01 ночи или 19 часов в сутки. В январе максимум нагрузки составил 700 кВт, а минимум – 400 кВт. В июле максимум нагрузки составил 420 кВт, а минимум – 300 кВт. Потребление дизельного топлива за 2020 г. составило 220 тонн, годовая выработка электрической энергии – 532 МВт·ч, при этом себестоимость электрической энергии равна 51,12 руб./кВт·ч.

В результате оптимизации структуры и параметров СДУ в поселке Кунгуртут получены следующие структура и параметры элементов СДУ, представленные в таблице 4.

Таблица 4 – Оптимальные структура, параметры элементов СДУ п. Кунгуртут

Элементы СДУ	ФЭП	АБ	ДГ
Тип элемента	DELTA BST 300-24M DUO	GX12-230	АД360-Т400
Количество элементов, шт.	993	2226	2
Мощность/Емкость АБ, кВт/кА·час	298	512	720

Сравнение показателей существующей ДЭС с полученной в результате оптимизации структурой и параметрами СДУ в Кунгуртут представлены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты оптимизации структуры и параметров СДУ в п. Кунгуртут

Вариант	Суммарные установленные мощности (емкость) элементов, кВт (кА·час)			Годовая выработка электроэнергии, МВт	Годовой расход топлива, тонн	Себестоимость электрической энергии, руб./кВт
	ФЭП	АБ	ДГ			
ДЭС	-	-	700	532	220	51,12
СДУ	298	512	720		88	26,79

Технико-экономические показатели полученной структуры и параметров СДУ в Кунгуртуг представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты расчетов технико-экономических показателей для оптимальной структуры СДУ п. Кунгуртуг

Показатели	Значение
Капитальные затраты, тыс. руб.	109159,28
Ежегодные издержки, тыс. руб.	5287,24
Денежный эквивалент «вытесненному» топливу, тыс. руб.	6142,5

Использование СДУ в АСЭС поселка Кунгуртуг дает возможность снизить потребление дизельного топлива более чем на 60 %.

Произведен выбор площадки для размещения элементов СДУ с использованием теории многокритерийной оптимизации и метода экспертных оценок на примере поселка Кунгуртуг (Республика Тыва). Анализ территории вокруг поселка позволил предложить четыре варианта размещения площадок, представленных на рисунке 4:



Рисунок 4 – Общий вид п. Кунгуртуг со спутника с вариантами размещения площадок для СДУ

Вариант № 1 – площадка без лесного массива, расположенная в северной части поселка и требующая предварительного выравнивания рельефа, с ограниченной возможностью дальнейшего расширения СДУ.

Вариант №2 – достаточно ровная площадка без лесного массива с возможностью дальнейшего расширения СДУ, расположенная в западной части поселка.

Вариант № 3 – площадка, расположенная в восточной части поселка и требующая предварительного выравнивания рельефа местности, с возможностью дальнейшего расширения СДУ при условии вырубке деревьев.

Вариант № 4 – ровная площадка с небольшим лесным массивом, с возможностью дальнейшего расширения СДУ, расположенная в южной части поселка.

Для выбора варианта площадки для размещения элементов СДУ на основе обобщения имеющегося опыта и опроса шести компетентных экспертов был определен перечень и определены весомости КС методом ранговой корреляции (табл. 7):

Таблица 7 – Оценки весомостей КС

№	КС	Весомость КС v_i
1	Максимум удобства монтажа и обслуживания СДУ	0,255
2	Максимум благоприятного рельефа местности и качества грунта	0,175
3	Максимум удобства компоновки ФЭП	0,167
4	Минимум воздействия на окружающую среду	0,07
5	Максимум возможности дальнейшего расширения СДУ	0,118
6	Максимум возможности ориентации преимущественно на юг и отсутствия высоких препятствий для СИ	0,215

Коэффициент конкордации (согласованности) мнений экспертов $C = 0,54$, подтвердил согласованность мнений экспертов с ранжированием КС. Для оценки значимости коэффициента конкордации определено значение квантили распределения $\chi^2_C = 16,2$. При числе степеней свободы 5 и уровне значимости $\alpha = 0,05$ определено табличное значение квантили распределения $\chi^2_{\text{табл}} = 11,2$. Поскольку $\chi^2_C \geq \chi^2_{\text{табл}}$, то с достоверностью 95 % можно утверждать, что коэффициент согласия значим и имеет место согласованность экспертов.

Получены оценки эффективности вариантов по каждому из КС и многокритериальные оценки эффективности вариантов, рассчитанные для среднеарифметической и гармонической форм свертки (табл. 8).

Исследования показали, что ошибки σ_F средней гармонической формы целевой функции значительно меньше, чем у арифметической формы, при тех же самых ошибках в определении v_i и e_{ij} . Эта форма обладает большей разрешающей способностью при сравнении близких по своим свойствам объектов с невысокой точностью оценок v_i и e_{ij} . Кроме того, средняя гармоническая форма весьма резко занижает оценки целевой функции у вариантов площадок, имеющих низкие показатели по отдельным свойствам.

Таблица 8 – Многокритериальная оценка эффективности вариантов площадок для размещения элементов СДУ в п. Кунгуртуг

№ варианта	Оценки весомостей КС						Форма свертки E^*	
	$v_1=0,255$	$v_2=0,175$	$v_3=0,167$	$v_4=0,07$	$v_5=0,118$	$v_6=0,215$	$F_{\text{ср.А}}^*$	F_{Γ}^*
	Оценка частных критериев e_{ij}							
1	0,812	0,687	0,5	0,667	0	0,562	0,578	0
2	0,417	0,812	1	0,729	0,5	0,812	0,7	0,628
3	0,687	0,271	1	0,292	0	0,25	0,464	0
4	0,583	0,729	0	0,812	1	0,625	0,585	0

Анализ результатов сравнения вариантов площадок для размещения элементов СДУ при многокритериальной оценке эффективности позволяет выбрать 2-й вариант площадки для поселка Кунгуртуг, у которого наибольшие значения целевой функции.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложена методика расчёта интенсивности солнечного излучения, основанная на методе Берда и дающая минимальные расхождения расчетных значений с наблюдаемыми данными 10–15 %. Согласно результатам расчета среднегодовых значений интенсивности солнечного излучения на горизонтальную поверхность, произведено районирование территории Республики Тыва по двум солнечным зонам.

2. Усовершенствована математическая модель ФЭП, позволяющая получить выходные энергетические характеристики ФЭП с учётом интенсивности солнечного излучения, температуры окружающей среды, технических характеристик и способа ориентации ФЭП в зависимости от географической широты места расположения ФЭП, времени года и суток.

3. Для проведения расчётов и визуального отображения результатов и графиков на ЭВМ математическая модель ФЭП была реализована в программной среде имитационного моделирования «Delphi 7». Рассчитаны прогнозируемые значения изменений интенсивности солнечного излучения и мощности ФЭП «SilaSolar 200 Вт» для ряда изолированных поселков Республики Тыва.

4. Выполнена оценка влияния реальной величины выработки электрической энергии ФЭП и графиков нагрузки потребителей на режимы работы АБ и ДГ.

5. Разработана методика оптимизации структуры и параметров СДУ с учётом изменения реальной величины выработки электрической энергии ФЭП и графиков нагрузки потребителей. Методика реализована в программной среде «MATLAB». Получены практические результаты расчета оптимальной структуры и параметров СДУ в поселках на территории Республики Тыва:

себестоимость электрической энергии составила 26 руб./кВт в поселке Кунгуртуг и 32 руб./кВт в поселке Кызыл-Хая; денежный эквивалент «вытесненному» топливу составил в поселке Кунгуртуг 2555,95 тыс. руб., в поселке Кызыл-Хая – 6142,5 тыс. руб.

6. Разработана методика выбора площадки для размещения элементов СДУ с использованием теории многокритерийной оптимизации и метода экспертных оценок. Представлены результаты обоснованного выбора оптимального варианта площадки для размещения СДУ в поселке Кунгуртуг.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Кенден, К.В. Оценка мощности фотоэлектрических преобразователей в системах автономного электроснабжения Республики Тыва / К.В. Кенден, В.А. Тремясов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Техника и технологии». – 2014. – № 7. – С. 966–975.

2. Кенден, К.В. Ресурсы гелиоэнергетики в Республике Тыва / К.В. Кенден // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2015. – № 4(231) . – С. 7–13.

3. Кенден, К.В. Оптимизация структуры генерирующих мощностей децентрализованной энергосистемы с фотоэлектрической установкой / В.А. Тремясов, К.В. Кенден // Журнал Сибирского федерального университета. Серия «Техника и технологии» . – 2016. – № 9(1). – С. 39–49.

4. Кенден, К.В. Оптимизация методом роя частиц структуры автономного энергетического комплекса с использованием солнечной энергии // К.В. Кенден, А.В. Кузнецов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2020. – № 3 (66). – С.31–40.

Публикации в других изданиях:

5. Кенден, К.В. Фотоэлектрические и гидроэнергетические установки в системах автономного электроснабжения: монография / В.А. Тремясов, К.В. Кенден // Красноярск: СФУ. – 2017. – 208 с.

6. Кенден, К.В. Оценка ресурсного потенциала возобновляемых источников энергии Республики Тыва и возможности его использования // Вестник Туvinского государственного университета. №3 Технические и физико-математические науки. – 2011. – № 3 (10) . – С. 92–99.

7. Кенден, К.В. Анализ использования перспективных видов энергии в Республике Тыва / К.В. Кенден // Вестник Туvinского государственного

университета. Технические и физико-математические науки. – 2012 – № 3. – С. 68–71.

8. Кенден, К.В. Анализ состояния энергоснабжения и исследование солнечного потенциала населенных пунктов Республики Тыва / К.В. Кенден // Материалы IV республиканской научно-технической конференции «Развитие инженерных технологий в строительстве и коммунальном хозяйстве». – Кызыл : РИО ТувГУ. – 2013. – С. 77–82.

9. Кенден, К.В. Оценка ресурсного потенциала возобновляемых источников энергии Республики Тыва / В.А. Тремясов, К.В. Кенден // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: Сборник трудов седьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Благовещенск : Издательство АмГУ. – 2013. – С. 274–277.

10. Кенден, К.В. Анализ экономической целесообразности применения ветроэнергетических установок в составе энергокомплексов / О.А. Григорьева, В.А. Тремясов, К.В. Кенден // Природные ресурсы и экология Дальневосточного региона: материалы Международного научно-практического форума. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. Ун-та. – 2013. – С. 375–378.

11. Кенден, К.В. Дизель-солнечные установки для электроснабжения отдаленных районов Республики Тыва / К.В. Кенден, В.А. Тремясов // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: Сборник трудов седьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Благовещенск: Издательство АмГУ. – 2013. – С. 274–278.

12. Кенден, К.В. Использование солнечной энергии в системах электроснабжения населенных пунктов Тывы / К.В. Кенден, В.А. Тремясов, А. В. Бобров // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: материалы трудов XIX Всероссийской научно-технической конференции / Томский политехнический университет, 4-6 декабря 2013 – Томск: Изд-во ООО «Скан» . – 2013. – Т.1. – С. 182–185.

13. Кенден, К.В. Перспективы использования малой гидроэнергетики на территории Республики Тыва / В.А. Тремясов, К.В. Кенден // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: Сборник трудов седьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Благовещенск : Издательство АмГУ. – 2013. – С. 278–281.

14. Кенден, К.В. Перспективы развития ветроэнергетики на территории с экстремально-низкими температурами в зимний период/ В.А. Тремясов, А. В.

Бобров, К.В. Кенден // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: материалы трудов XIX Всероссийской научно-технической конференции / Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во ООО «Скан» . – 2013. – С. 178–182.

15. Кенден, К.В. Определение выработки электроэнергии фотоэлектрической установкой с учётом графика нагрузки / К.В. Кенден, В.А. Тремясов, Т.В. Кривенко // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: Сборник трудов седьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Благовещенск: Издательство АмГУ. – 2015. – С. 472–477.

16. Кенден, К.В. Оценка надежности системы генерации малых ГЭС в изолированных энергосистемах / В.А. Тремясов, К.В. Кенден, Т.В. Кривенко // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: Сборник трудов седьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Благовещенск : Издательство АмГУ. – 2015. – С. 143–147.

17. Кенден, К.В. Деривационные малые гидроэлектростанции для электроснабжения отдаленных населенных пунктов Республики Тыва // К.В. Кенден, А.Э. Монгуш // Вестник Тувинского государственного университета. Технические и физико-математические науки. – 2015 – №3(26). – С. 93–97.

18. Кенден, К.В. Оптимизация структуры автономных солнечно-дизельных установок с аккумулярованием электроэнергии / В.А. Тремясов, К.В. Кенден, Т.В. Кривенко // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов: сборник трудов восьмой международной научно-технической конференции. – 2015. – С. 148–152.

19. Кенден, К.В. Анализ состояния энергоснабжения населенных пунктов республики тыва и перспективы его совершенствования / К.В. Кенден // Вестник Тувинского государственного университета. №3 Технические и физико-математические науки. – 2017. – № 3 (34). – С. 20-33.

20. Кенден, К.В. Обзор методов расчета реальной вырабатываемой мощности фотоэлектрического преобразователя / К.В. Кенден // В сборнике: Научные труды Тувинского государственного университета. Материалы ежегодной научно-практической конференции преподавателей, сотрудников и аспирантов ТувГУ, посвященной Году экологии в Российской Федерации и Году молодежных инициатив в Туве. – 2017. – С. 148-151.

21. Кенден, К.В. Обзор схем построения автономных систем электроснабжения, имеющих в своем составе фотоэлектрические преобразователи/ К.В. Кенден, Ш.Б. Майны // В сборнике: Возобновляемые

источники энергии: Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием и XI научной молодежной школы: 3-6 декабря 2018 года, Москва. – Москва: МАКС Пресс. – 2018. – С.72–80.

22. Кенден, К. В. Обзор методов оптимизации и программ моделирования автономных систем электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии / К. В. Кенден, А. В. Кузнецов // Современные проблемы электроэнергетики и пути их решения : Материалы III Всероссийской научно-технической конференции, Махачкала, 21–22 декабря 2018 года. – Махачкала: Дагестанский государственный технический университет. – 2018. – С. 218–220.

23. Кенден, К.В. Проблемы и перспективы развития энергетического комплекса республики Тыва / К.В. Кенден, К.Б. Сагаан-оол, Ю.Ч. Ондар // Омский научный вестник. – 2018. – № 6. – С. 150–153.

24. Кенден, К.В. Перспективы развития децентрализованной энергетики в Республике Тыва / С.А. Кужугет, К.В. Кенден // Актуальные вопросы энергетики: материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – 2018. – С. 185–187.

25. Кенден, К.В. Электроснабжение села Тоолайлыг с использованием энергии малых рек / С.А. Кужугет, К.В. Кенден // В сборнике: Актуальные проблемы исследования этноэкологических и этнокультурных традиций народов Саяно-Алтая. Материалы V-ой международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. – 2018. – С. 176-178.

26. Кенден, К.В. Пути снижения потерь электроэнергии в Республике Тыва / А.А. Ооржак, К.В. Кенден В сборнике: Актуальные проблемы исследования этноэкологических и этнокультурных традиций народов Саяно-Алтая. Материалы V-ой международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. 2018. С. 184-185.

27. Кенден, К.В. Методы расчета гидроэнергетического потенциала рек Республики Тыва / К.В. Кенден // Вестник Тувинского государственного университета. Технические и физико-математические науки. – 2019. – № 3 (46) . – С. 52–60.

28. Кенден, К.В. Потери электроэнергии республики тыва и пути их снижения / К.В. Кенден, А.А, Ооржак // В сборнике: энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов. Сборник трудов IX международной научно-технической конференции. 2019. с. 46-49.

29. Кенден, К.В. Использование энергии малых рек как альтернативный источник энергоснабжения села Тоолайлыг / К.В., Кенден, С.А. Кужугет // В сборнике: энергетика: управление, качество и эффективность

использования энергоресурсов. Сборник трудов IX международной научно-технической конференции. – 2019. – С. 28-31.

30. Кенден, К.В. Оценка надежности системы генерации малых гэс на примере тоджинского района/ К.В. Кенден // Вестник Тувинского государственного университета. . – №3 Технические и физико-математические науки. – 2020. – № 2 (62) . – С. 31-40.

31. Кенден, К.В. Математические методы оптимизации автономных систем электроснабжения на основе солнечно-дизельных установок / К.В. Кенден, С.М Сарыг-оол // Вестник Тувинского государственного университета. Технические и физико-математические науки. – 2020. – № 3. – С. 31–40.

Результаты интеллектуальной собственности:

32. Свид. о гос. рег. прогр. для ЭВМ 2019613429. Программа расчета прогнозируемых значений вырабатываемой мощности фотоэлектрического преобразователя / Кенден К.В., правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тувинский государственный университет» – № 2019613429; заявл. 24.01.2019.; зарег. в Реестре прогр. для ЭВМ 18.03.2019.

33. Свид. о гос. рег. прогр. для ЭВМ 2019614383. Оптимизация структуры автономных систем электроснабжения на основе солнечно-дизельных установок / Кенден К.В., Кузнецов А.В. правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тувинский государственный университет» – № 2019614383; заявл. 24.01.2019.; зарег. в Реестре прогр. для ЭВМ 03.04.2019.