

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

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

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

Тремясов Владимир Анатольевич

кандидат технических наук, доцент

Красноярск 2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В АВТОНОМНЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ	11
1.1 Особенности АСЭС и пути их совершенствования на примере Республики Тыва	11
1.2 Перспективы использования солнечной энергии в Республике Тыва	17
1.3 Анализ методической и нормативной базы для решения задач по вводу СДУ	21
1.4 Структурная схема и математические модели элементов СДУ	24
1.5 Обзор математических методов оптимизации и программно-вычислительных комплексов при создании СДУ	27
Выводы по главе 1	35
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЫХОДНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ	37
2.1 Методы получения данных о распределении величины интенсивности СИ на территории России	37
2.2 Методика оценки интенсивности СИ на горизонтальную поверхность	40
2.3 Метод расчёта выходных энергетических параметров ФЭП	47
2.4 Описание компьютерной имитационной программы моделирования математической модели ФЭП	54
Выводы по главе 2	57
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ВВОДУ МОЩНОСТЕЙ АВТОНОМНЫХ СОЛНЕЧНО-ДИЗЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК	58
3.1 Методики оптимизации структуры и параметров СДУ	58

3.1.1 Методика расчёта выработки электроэнергии элементами при различных режимах функционирования СДУ	58
3.1.2 Метод роя частиц при оптимизации структуры и параметров СДУ	64
3.1.3 Описание программы для ЭВМ при оптимизации структуры и параметров СДУ	67
3.2 Интеллектуальная поддержка принятия решений при выборе площадки размещения элементов СДУ	69
Выводы по главе 3	77
ГЛАВА 4. ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ ПО ВВОДУ МОЩНОСТЕЙ СОЛНЕЧНО-ДИЗЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ПОСЕЛКОВ РЕСПУБЛИКИ ТЫВА	78
4.1 Оценка интенсивности СИ и районирование Республики Тыва по солнечным зонам	78
4.2 Расчеты прогнозируемых выходных энергетических характеристик ФЭП в АСЭС	80
4.3.1 Оптимизация структуры и параметров СДУ на примере поселка Кызыл-Хая.....	83
4.3.2 Оптимизация структуры и параметров СДУ на примере поселка Кунгуртуг.....	85
4.4 Обоснование выбора площадок для размещения элементов СДУ	87
Выводы по главе 4.....	91
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	93
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	95
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	111
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	112
ПРИЛОЖЕНИЕ В.....	113
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	114
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	115

ВВЕДЕНИЕ

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 высокие потери электрической энергии и многократное ее удорожание, эксплуатация, как правило, устаревших и физически изношенных децентрализованных источников приводит к недостаточной надежности 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, а соответственно в целом всей страны. 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, позволяющих снизить топливную составляющую в себестоимости, вырабатываемой электрической энергии и повышении их технико-экономической эффективности.

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

Степень разработанности. Методам принятия 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. Суслов, 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 ученых предложены различные подходы к учету 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 потребителя на режимы работы электрогенерирующих элементов СДУ и технико-экономические показатели СДУ;

– учет 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 из условия минимальной себестоимости электрической энергии СДУ с возможностью учитывать изменения реальной величины выработки электрической энергии ФЭП и графиков нагрузки потребителя, и выбор площадки для размещения элементов СДУ, позволяющих 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; проведен выбор математических методов

оптимизации СДУ и программно-вычислительных комплексов (ПВК), соответствующих требованиям поставленных задач в диссертационной работе.

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 (СИ) и расчёт прогнозируемых значений выходных энергетических характеристик ФЭП в поселках и 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 дизельных генераторов (ДГ).

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

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

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.

Научная новизна и положения, выносимые на защиту:

– усовершенствована математическая модель ФЭП, позволяющая определить выходные энергетические характеристики ФЭП с учетом интенсивности СИ, температуры окружающей среды, технических характеристик и способа ориентации ФЭП в зависимости от географической широты места расположения ФЭП, времени года и суток. Создан ПВК, реализующий математическую модель ФЭП.

– разработана методика оптимизации структуры и параметров СДУ из условия минимальной себестоимости электрической энергии, и создан ПВК, отличающийся возможностью учитывать изменения реальной величины выработки электрической энергии ФЭП и графиков нагрузки потребителя и осуществляющий поиск оптимального соотношения генерирующих мощностей, выбора оптимального единичного типоразмера оборудования.

– предложена методика принятия решений при выборе площадки для размещения элементов СДУ, учитывающая комплекс технико-экономических, климатических и экологических критериев с использованием теории многокритерийной оптимизации и метода экспертных оценок.

Практическая значимость работы.

На основе усовершенствованной модели ФЭП и методики оптимизации для удобства использования и повышения эффективности выполнения расчетов создан ПВК для проведения исследований выходных параметров ФЭП.

Разработана методика оптимизации структуры и параметров СДУ и, реализующий её, ПВК, который позволяет выполнять оптимизацию СДУ в АСЭС при проектировании.

Результаты диссертационной работы использованы в деятельности Министерства топлива и энергетики Республики Тыва (приложение А).

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

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.

Диссертант участвовал в выполнении научно-исследовательских работ: «Технико-экономическая оценка возможности использования ВИЭ на территории Красноярского края в разрезе муниципальных образований края», «Технико-экономическое обоснование мероприятий по модернизации АСЭС Енисейского района Красноярского края» в рамках долгосрочной целевой программы «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности в Красноярском крае» на 2010-2012 годы и на период до 2020 года».

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».

Публикации. По теме диссертации опубликовано более 30 печатных работ, 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.

В первой главе «Анализ возможности использования солнечной энергии в автономных системах электроснабжения» представлены особенности и пути совершенствования АСЭС на примере Республики Тыва: характеристики ДЭС, удельная установленная мощность на одного человека, потребление дизельного топлива и выработка электрической энергии. Анализ местных возобновляемых энергоресурсов на территории Тывы позволил обосновать возможность использования в АСЭС на базе 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 ПВК для моделирования СДУ, обоснована необходимость усовершенствования математической модели ФЭП, разработки методики оптимизации структуры и параметров СДУ.

Во второй главе «Математическая модель для оценки выходных энергетических характеристик фотоэлектрического преобразователя» усовершенствована математическая модель ФЭП, позволяющая определить 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.

В третьей главе «Разработка методов принятия решений по вводу мощностей автономных солнечно-дизельных установок» представлены методика оптимизации структуры и параметров СДУ, учитывающая изменения реальных энергетических характеристик ФЭП, графиков нагрузки потребителя 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 четвертой главе «Принятие решений по вводу мощностей солнечно-дизельных установок для поселков Республики Тыва» произведено

районирование территории Республики Тыва по солнечным зонам; рассчитаны прогнозируемые значения изменений интенсивности СИ 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 заключении приведены основные результаты, полученные в рамках данной диссертационной работы.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В АВТОНОМНЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

1.1 Особенности АСЭС и пути их совершенствования на примере Республики Тыва

Малая энергетика России на сегодняшний день представлена до 50 тысяч преимущественно ДЭС (более 98% от общего числа) средней единичной мощностью ~340 кВт и суммарной мощностью 17 млн. кВт (8% от общей установленной в России мощности), вырабатывающими до 50 млрд. кВт·ч и потребляющими ~17 млн. т.у.т. в год (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Районирование территории России по зонам энергоснабжения

Основой комплекса децентрализованного электроснабжения Республики Тыва является ООО «Дизель». На 01.01.2020 г. установленная электрическая мощность объектов ООО «Дизель» составила 5,61 МВт. В регионе

функционируют 12 ДЭС различных типов, модификаций и года выпуска, которые затрудняют процессы сервисного обслуживания и ремонта (таблица 1.1) [1].

Таблица 1.1 – Характеристики ДЭС на территории Республики Тыва

Наименование	Марка	Установленная мощность, кВт	Количество агрегатов, шт.	Год ввода в эксплуатацию
Качык	АД30С-Т400-1РН	30	1	2013
Севи	АД30С-Т400-1РМ6	30	1	2009
Тал	АД60С Т4001РМ6	60	1	2010
Хут	АД60С-Т400-1РМ6	60	1	2009
Хамсара	ДЭУ-30.1	30	2	2013
Сыстыг-Хем	А-01м	60	1	2005
	ДЭУ-30.1	30	1	2013
Усть-Ужеп	ВДМ 100.1 ЯМЗ-238	100	1	2008
	АД60С-Т400-1РМ6	60	1	2009
Кызыл-Хая	ВДМ 100.1 ЯМЗ-238	100	1	2008
	ВДМ 200.1 ЯМЗ-238	200	1	2008
Ырбан	ДГА-320	320	1	1987
	АД200С-Т400	200	1	2010
Кунгуртуг	ДЭУ-400.1	400	1	2007
	АД-200С-Т400	200	1	2013
	ЯМЗ-238	100	1	2003
Мугур-Аксы	SHANGHAI DIESEL ENGINE SC9D340D3	200	6	2014
Тоора-Хем	ДГ-7364Н36/45	800	3	1986

Основанная на ДЭС малая энергетика в Республике Тыва является единственной энергетической базой, которая обеспечивает жизнедеятельность и функционирование потребителей жилищно-коммунального сектора и муниципальных образований, промышленных предприятий и хозяйствующих

субъектов малого и среднего бизнеса, находящихся в зоне децентрализованного энергоснабжения.

Отличительной особенностью зоны децентрализованного энергоснабжения Республики Тыва является совокупность малой энергетики, которая характеризуется достаточно большой площадью обслуживания при низкой плотности населения. Зона децентрализованного энергоснабжения охватывает порядка 45 % территории Республики Тыва, на которой расположены 6 муниципальных районов с 12 изолированными поселками общей численностью населения 12 тыс. человек (рисунок 1.2) [1].



Рисунок 1.2 – Районирование Республики Тыва по зонам энергоснабжения:

- 1 – Бай-Тайгинский; 2 – Барун-Хемчикский; 3 – Дзун-Хемчикский;
 4 – Каа-Хемский; 5 – Кызылский; 6 – Монгун-Тайгинский; 7 – Овюрский;
 8 – Пий-Хемский; 9 – Сут-Хольский; 10 – Тандынский; 11 – Тере-Хольский;
 12 – Тес-Хемский; 13 – Тоджинский; 14 Улуг-Хемский; 15 – Чаа-Хольский;
 16 – Чеди-Хольский; 17 – Эрзинский районы

Удельная установленная мощность на одного человека в изолированных поселках не соответствует принятым нормативам (рисунок 1.3) [1–3].

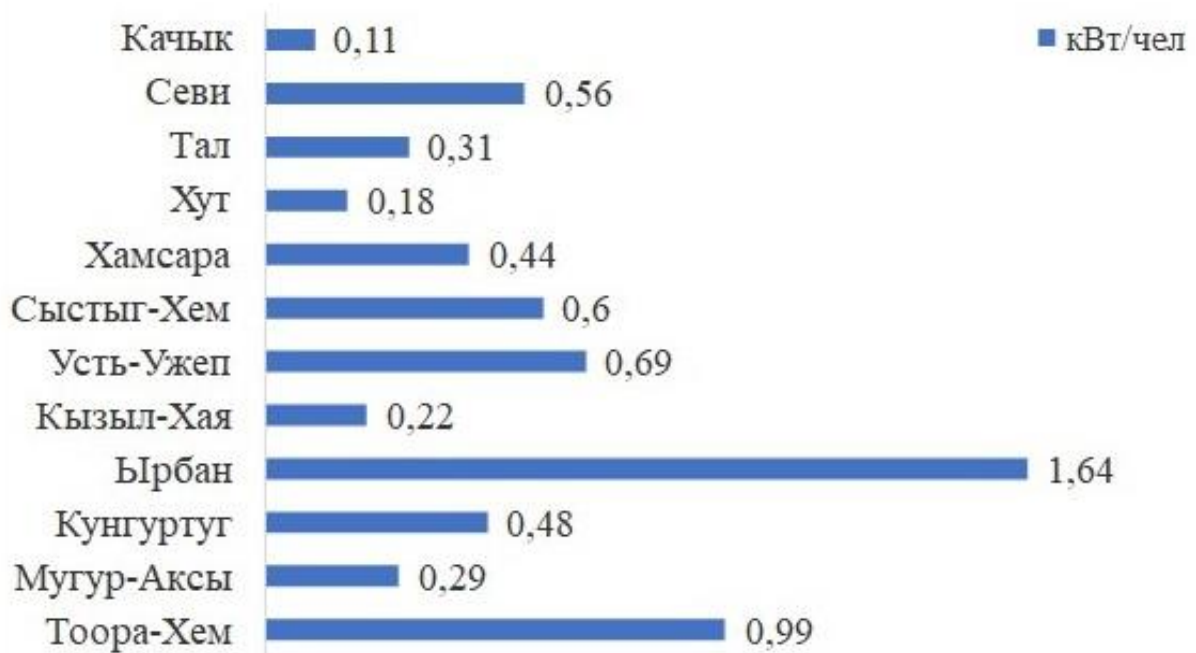


Рисунок 1.3 – Удельная установленная мощность на человека в изолированных поселках Республики Тыва

За 2020 г. в изолированных поселках Республики Тыва для производства электрической энергии всего было израсходовано 3256 т. дизельного топлива (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Годовые значения потребления дизельного топлива и выработки электрической энергии ДЭС

Наименование ДЭС	Годовое потребление дизельного топлива, тонн	Годовая выработка электрической энергии, МВт·час
Качык	47	59
Севи	15	20
Тал	26	196

Продолжение таблицы 1.2 – Годовые значения потребления дизельного топлива и выработки электрической энергии ДЭС

Хут	26	55
Хамсара	34	66
Сыстыг-Хем	14	94
Усть-Ужеп	42	240
Кызыл-Хая	220	388
Ырбан	180	591
Кунгуртуг	220	532
Мугур-Аксы	850	2732
Тоора-Хем	1582	4999
Итого:	3256	9972

Доставка горюче-смазочных материалов (ГСМ) до республики осуществляется от оптовых поставщиков г. Абакан, Минусинск и Ачинск из-за отсутствия железной дороги только автомобильным транспортом, а завоз ГСМ от столицы республики в связи с труднодоступностью и отдаленностью до изолированных поселков осуществляется один или два раз в год [1].

Увеличение топливных расходов ведет к сокращению затрат на заработную плату, капитальный ремонт, услуги производственного характера, связанных с недостатком средств и приоритетом расходов на топливо.

Схожими социальными факторами, порожденных суровыми климатическими условиями в изолированных поселках Республики Тыва, как и во всех других регионах Сибири, Севера и Дальнего Востока являются [4–5]:

- низкая плотность населения;
- общая социально-экономическая отсталость;
- отсутствие стабильных транспортных систем и резкое снижение грузопотоков ввиду сокращения поставок топлива, используемого транспортными хозяйствами;

- подавляющее большинство сельских поселков не оснащено инженерными коммуникациями;

- ярко выраженная сезонность в сельскохозяйственной деятельности местного населения [6].

Сдерживающими факторами для развития АСЭС являются:

- отсутствие программ для поддержки тарифов и заказчика на использование малой генерации в ЖКХ;

- слабая приспособленность структур электроэнергетики к расширению участия в них малых энергоустановок;

- сложности с технологическим присоединением генерирующих установок к единой сети.

Проблема низкой эффективности электроснабжения изолированных поселков в республике решается заменой устаревших ДЭС на новые ДЭС с небольшой корректировкой их установленной мощности. Однако данное решение имеет объективные ограничения из-за высокой стоимости дизельного топлива и трудностей доставки. Эффективным вариантом совершенствования АСЭС в регионе на сегодняшний день является их построение с ориентацией на местные возобновляемые энергоресурсы [7–10].

Низкий уровень развития транспортной инфраструктуры и многозвенность процесса завоза топлива обуславливают высокие потери электрической энергии и многократное ее удорожание, эксплуатация, как правило, устаревших и физически изношенных децентрализованных источников приводит к недостаточной надежности 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, а соответственно в целом всей страны.

Одним из главных направлений государственной политики в энергетической стратегии России до 2035 года считается обеспечение энергетической безопасности страны, в том числе за счет надежного и

качественного энергоснабжения в ряде удаленных регионов и в районах с низкой плотностью потребителей. Согласно стратегии предусмотрено развитие технологий использования ВИЭ, в том числе для электро- и теплоснабжения автономных потребителей, расположенных в системах децентрализованного энергоснабжения [1, 11].

1.2 Перспективы использования солнечной энергии в Республике Тыва

На территории региона использование ВИЭ, прежде всего, характеризуется климатическими и географическими особенностями исследуемой местности. Оценка природных местных ресурсов Республики Тыва производилась на основе материалов [1, 12–16].

Энергия ветра. Перспективной зоной использования ветроэнергетических установок (ВЭУ) на территории России, по мнению Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева, считается зона со среднегодовой скоростью ветра более 5 м/с. При этом повторяемость скоростей ветра должна носить выраженный сезонный характер в диапазоне среднегодовой скорости от 3 до 5 м/с. Энергия ветра может быть использована в весенний и осенний периоды, ограничивая сферу применения ВЭУ [17–19].

На территории республики метеостанции (высота флюгера в пределах 9–19 м) расположены только в муниципальных центрах районов Республики Тыва. На рисунке 1.4 представлены среднемесячные скорости ветра за 10 лет за 2001–2011 гг. [12].

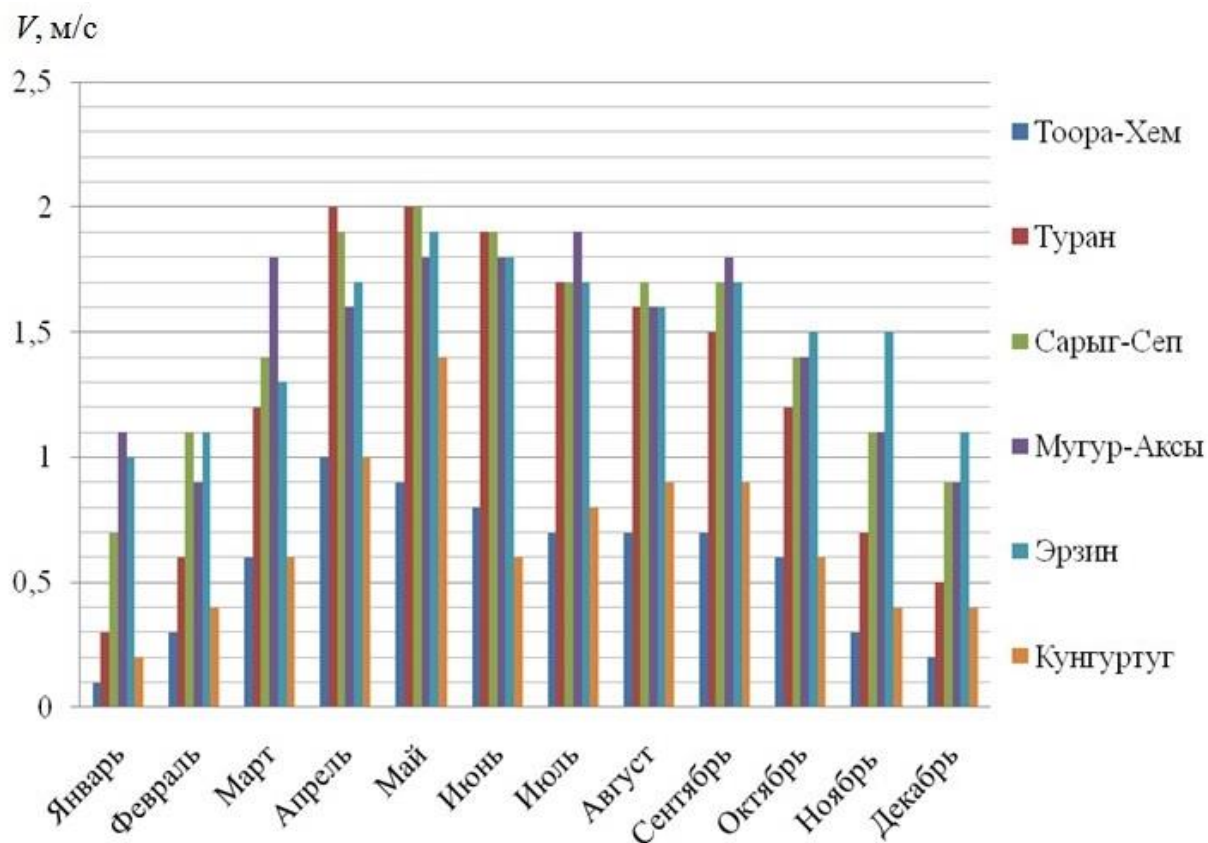


Рисунок 1.4 – Среднемесячные скорости ветра в метеостанциях, расположенных в муниципальных центрах, изолированных поселков Республики Тыва за 2001–2011 гг. [12]

Таким образом, значения среднемесячных скоростей ветра, полученные с метеостанций Республики Тыва, подтверждают вывод о непригодности территории вблизи мест установки метеостанций для установки ВЭУ. Однако, в низинах, горных и предгорных районах скорость ветра может иметь малые значения, но на вершинах появляется возможность получить достаточно высокую производительность ВЭУ. Для определения локальных зон высокого ветроэнергетического потенциала на территории Республики Тыва требуется изучить местность с использованием других имеющихся методик оценки ветроэнергетического потенциала.

Энергия биомассы. Основной массой энергетического потенциала отходов сельского хозяйства в республике является навоз мелкого рогатого скота, который составляет порядка 100–150 тыс. т. в год. Однако достаточно малый размер

сельского хозяйства, кочевой уклад жизни сельскохозяйственного производства и суровые климатические условия региона ставят ряд ограничений для развития энергии биомассы в регионе [13].

Общая площадь лесов на территории Республики Тыва составляет порядка 11390,6 тыс. Га (67,4% её общей земельной площади). Однако на имеющийся ресурсный потенциал в регионе почти половина заготовки древесины осуществляется в теплоэнергетических целях. Отсутствие деревообрабатывающих предприятий и сельскохозяйственной промышленности формирует в регионе неблагоприятные предпосылки развития электростанций на биотопливе [13].

Гидроэнергетика. Суммарный гидроэнергетический потенциал рек на территории республики по оценке ПАО «РусГидро» достигает 8 ГВт. Правительством Республики Тыва в 1997 г. было принято постановление «О национальной программе энергообеспечения Республики Тыва за счет использования нетрадиционных ВИЭ на 1997–2000 гг.». Таким образом, ООО «Проектно-изыскательным институтом Красноярскгидропроект» (1991 г.), АО «Ленгидропроект» (1995 г.) и швейцарской фирмой PROMOS S.A. (1992 г.) были проведены проектно-исследовательские работы по размещению 17 малых гидроэлектростанций (МГЭС) общей проектной мощностью 6 МВт и была разработана схема размещения объектов и концепция развития малой гидроэнергетики на территории республики [1, 20–23].

В 2001 г. на р. Моген-Бурен построена МГЭС деривационного типа с общей установленной мощностью 165 кВт для электроснабжения изолированных потребителей с. Кызыл-Хая, получавших электроснабжение от ДЭС (рис. 1.5) [23]. Однако опыт строительства и эксплуатации в крайне суровых природных условиях республики выявил необходимость совершенствования конструкторских решений, использованных как при проектировании и сооружении гидроузла, так и при создании оборудования [6].

Геотермальная энергия. По географическому положению территория республики расположена в зоне с температурным градиентом равным менее 40

°С/км. Геотермальные электрические станции в условиях республики не имеют практического интереса, т.к. выработка электрической энергии экономически целесообразна при температуре теплоносителя более 90 °С [13].

Энергия Солнца. Количество солнечных дней в году и значения солнечной инсоляции характеризуют возможность использования солнечной энергии [6, 24–25].

Азиатский максимум обеспечивает максимальные ясные дни зимой при наклоне Солнца над горизонтом и минимальную продолжительность дня (рисунок 1.5) [13].

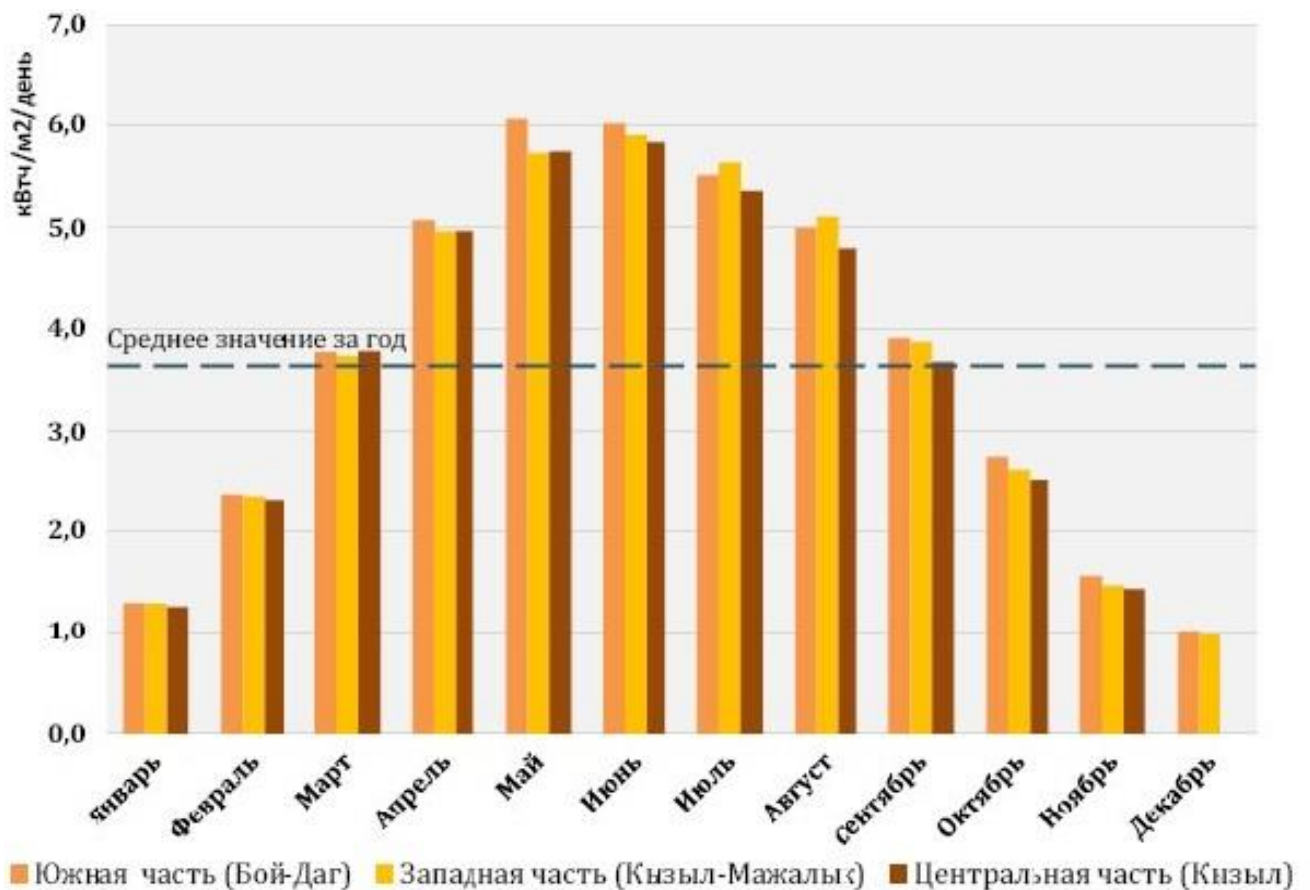


Рисунок 1.5 – Уровень солнечной инсоляции на территории Республики Тыва

Число солнечных дней в году в г. Кызыл в среднем составляет более 200, а в южных и западных районах региона еще больше. Также развитию солнечной

энергетики в Республике Тыва способствуют низкие температуры, позволяющие достигать максимального значения КПД ФЭП [13].

В рамках энергосервисного контракта за счёт собственных средств группы компаний «Хевел» впервые в 2019 г. в изолированных поселках Республики Тыва Мугур-Аксы и Кызыл-Хая, функционирующих от ДЭС, были введены в эксплуатацию автономные СДУ с общей установленной мощностью 550 кВт и емкостью АБ 710 кВт·ч. Такая финансовая модель позволила избежать региону роста тарифов для конечных потребителей электрической энергии и обеспечить снижение нагрузки на региональный бюджет за счёт сокращения субсидий на компенсацию затрат по поставке дизельного топлива после завершения срока возврата инвестиций в рамках энергосервисного контракта. При этом за счет использования ФЭП совместно с АБ значительно сократились расходы на дизельное топливо и его поставку.

Также положительный опыт использования солнечной энергии имеют граничащие с республикой регионы со схожим климатом, как Алтай и Хакасия. Таким образом, климатические и природные условия способствуют широкому и эффективному внедрению энергии Солнца на территории Республики Тыва.

Анализ местных возобновляемых энергоресурсов Республики Тыва допускает возможность использования энергии Солнца в АСЭС.

1.3 Анализ методической и нормативной базы для решения задач по вводу СДУ

Министерством энергетики с участием других заинтересованных министерств и ведомств России, а также региональных властей в 90-х гг. была разработана «Программа энергообеспечения районов Крайнего Севера и приравненных к ним территорий, а также мест проживания малочисленных народов Севера, Сибири и Дальнего Востока за счет использования

нетрадиционных ВИЭ и местных видов топлива», согласно которой планировалось ввести в действие около 400 МГЭС и других источников электроэнергии на базе ВИЭ суммарной мощностью более 600 МВт в течение 5 лет. Программа не была реализована по ряду причин, главной из которой явилось отсутствие финансирования.

В 2007 г. были приняты поправки в Федеральный закон «Об электроэнергетике», в котором был представлен полный перечень ВИЭ, намечены основные направления и методы поддержки ВИЭ [26]:

- выпуск сертификатов, подтверждающих определенный объем генерации на основе ВИЭ, с последующим погашением;
- установление надбавки к равновесной цене оптового рынка для генераторов на основе ВИЭ;
- установление обязательного объема покупки электрической энергии, произведенной на основе ВИЭ, для покупателей на оптовом рынке.

Указ Президента РФ от 4 июня 2008 г. № 889 «О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики» определил необходимость выделения бюджетных ассигнований на реализацию проектов в области использования ВИЭ [27].

От 8 января 2009 г. распоряжением Правительства РФ были утверждены «Основные направления государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2020 года». В нем определены целевые показатели объемов ввода установленной мощности генерирующих объектов, функционирующих на основе ВИЭ. В соответствии с проектом схемы и программы развития ЕЭС России на 2013–2019 гг. целевые показатели объемов ввода объектов генерации на основе ВИЭ должны обеспечить долю 2,5 % в структуре установленной мощности ЕЭС России [28].

Согласно постановлению Правительства Российской Федерации № 823 «О схемах и программах перспективного развития электроэнергетики» в 2009 г. региональные схемы и программы развития электроэнергетики разрабатываются

и утверждаются субъектами Российской Федерации [29]. Одним из механизмов поиска местных инвестиций для развития малой энергетики является определенная Федеральным законом № 261-ФЗ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 23 ноября 2009 г. возможность создания региональных и муниципальных программ в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности [29].

В декабре 2011 г. Постановлением Правительства Российской Федерации № 1178 были утверждены «Основы ценообразования в области регулируемых цен (тарифов) в электроэнергетике», где указывается, что розничные тарифы должны обеспечивать инвесторам возможность возмещения инвестиционных затрат по проектам ВИЭ [29].

В соответствии с Постановлением Правительства РФ № 449 от 28 мая 2013г. определены следующие механизмы поддержки в изолированных энергосистемах – установление долгосрочных тарифов на покупку электрической энергии от объектов ВИЭ на период окупаемости и включение проектов ВИЭ в Федеральные целевые программы [29].

В январе 2015 г. подписано Постановление Правительства РФ №47 от 23.01.2015 г., которым вносятся изменения в нормативные акты, направленные на регулирование вопросов, связанных с поддержкой генерирующих объектов, функционирующих на основе использования ВИЭ на розничных рынках. Документ определяет порядок долгосрочного тарифного регулирования и предельные цены на электрическую энергию, произведенную на основе ВИЭ. Документом предусматривается, что на этапе квалификации генерирующего объекта ВИЭ устанавливается требование по обязательному включению такого объекта в схему перспективного развития электроэнергетики субъекта РФ.

Обеспечение энергетической безопасности страны, в том числе за счет надежного и качественного электроснабжения в ряде удаленных регионов и в районах с низкой плотностью потребителей является одним из главных направлений государственной политики в энергетической стратегии России до

2035 г. В рамках стратегии предусматривается развитие технологий использования ВИЭ, в том числе для электро- и теплоснабжения изолированных потребителей, расположенных в системах автономного энергоснабжения [11].

1.4 Структурная схема и математические модели элементов СДУ

Оптимизация состава элементов СДУ, которая является важнейшей задачей данной диссертационной работы, включает следующие элементы:

- ФЭП для генерации электрической энергии;
- АБ для хранения выработанной энергии и сглаживания несовпадения по времени графиков потребляемой и вырабатываемой ФЭП электрической энергии [30];
- ДГ для повышения надежности и стабильности электроснабжения потребителя.

В настоящее время разработаны различные схемы соединения элементов СДУ в зависимости от типа и назначения системы [31]. Учитывая выбранный состав оборудования, целесообразно использовать вариант схемы соединения элементов СДУ, представленный на рисунке 1.6.

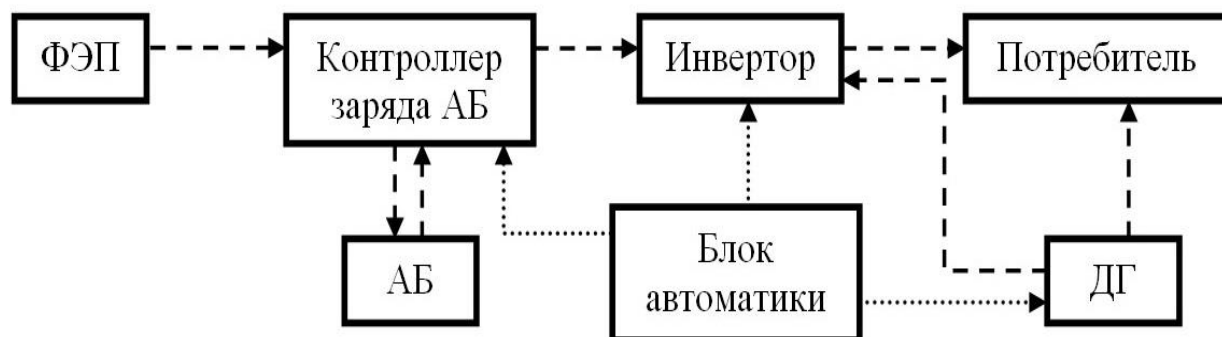


Рисунок 1.6 – Структурная схема СДУ

На схеме потоки энергии, циркулирующие между элементами системы, представлены пунктирными линиями, а командные связи между блоком автоматики и управляемыми устройствами – точечными линиями.

В структурной схеме ФЭП подключен к контроллеру заряда АБ. Конструкция контроллера позволяет передавать вырабатываемые ФЭП мощности непосредственно на инвертор, минуя АБ. В случае избытка или недостатка в системе вырабатываемой мощности контроллер осуществляет заряд или разряд АБ [32].

Обеспечение потребителя электрической энергией заданного качества осуществляется с помощью инвертора. В системе основным источником электрической энергии является ФЭП, характер вырабатываемой в нем мощности отличается значительной неравномерностью, которая в большинстве случаев сглаживается наличием в системе АБ. Однако для повышения надежности электроснабжения и восполнения недостатка электрической энергии, вырабатываемой основными источниками, в состав системы включен резервный источник энергии ДГ. Недостаток/избыток энергии контролируется блоком автоматики, который от инвертора автоматически подключает ДГ. Вырабатываемая генератором мощность идет на обеспечение нужд потребителя совместно с ФЭП [30, 32].

Фотоэлектрические преобразователи

Методам расчета выходных энергетических характеристик ФЭП посвящено достаточное количество зарубежных и отечественных работ [33–48]. В ряде работ [33–38] мощность ФЭП определяют путем простого умножения среднемесячной интенсивности СИ на горизонтальную поверхность на общую установленную площадь ФЭП, и КПД ФЭП.

Методы, построенные на базе эквивалентной модели ФЭП, дают возможность более детально изучить внутренние параметры ФЭП [37, 41].

Расчет выработки электрической энергии ФЭП в зависимости от параметров окружающей среды ФЭП приводится в работах [39, 45–46]. Например, в работе

[47] мощность ФЭП определяется построением эмпирических зависимостей от ряда параметров окружающей среды ФЭП и выведением уравнений ожидаемой мощности ФЭП по результатам экспериментов и обработки данных наблюдений. Однако метод отличается от других множеством экспериментов в течение нескольких лет и обработки больших массивов данных.

Анализ зарубежных и отечественных источников литературы по расчету выработки электрической энергии ФЭП выявил необходимость усовершенствования математической модели ФЭП, позволяющей получить выходные энергетические характеристики ФЭП и учитывающей интенсивность СИ, температуру окружающей среды, технические характеристики и способ ориентации ФЭП в зависимости от географической широты места расположения ФЭП, времени года и суток.

Аккумуляторные батареи

При оптимизации элементов СДУ используются различные математические модели АБ, определяющие ее эксплуатационные характеристики. В работе [49] емкость АБ определяется по данным завода-изготовителя. Следует отметить, модель АБ [50–53], основанную на обобщенном соотношении Шеферда. В модели по разрядному току и фактическому уровню заряда АБ при нормальных условиях рассчитывается напряжение АБ, которое обеспечивает удовлетворительные результаты сходимости режимов разряда и заряда различных типов АБ. Данная модель используется во многих работах для расчета эксплуатационных параметров различных типов АБ [53].

Дизельные генераторы

Как резервный источник, ДГ начинает работать тогда, когда вырабатываемой от ФЭП и накопленной в АБ электрической энергии недостаточно для покрытия нагрузки потребителя. В работах [54–55] при оптимизации АСЭС на основе ВИЭ используется модель ДГ, в которой расход

дизельного топлива определяется по выходной и номинальной мощностям и коэффициентами кривой потребления.

1.5 Обзор математических методов оптимизации и программно-вычислительных комплексов при создании СДУ

Для решения оптимизационных задач в настоящее время разработано большое количество математических методов и программ моделирования СДУ [56, 57].

В зависимости от возможности нахождения целевой функции в [58] представлены наиболее часто используемые математические методы оптимизации АСЭС на основе ВИЭ: «генетический алгоритм», «метод роя частиц» и «моделируемый отжиг» [59] (таблица 1.3).

Метод «Генетический алгоритм». В начале метод предлагает случайные решения для системы. Каждое из случайных решений оценивается в соответствии с целевой функцией. Далее выбор определенного процента исходной популяции дает возможность предоставления новых возможных решений для достижения более высоких значений пригодности. Затем на каждой итерации продолжается выбор решений с наилучшей целевой функцией и создание новой популяции. Процедура, состоящая из циклов отбора, скрещивания и мутации, продолжается до окончания итерационного процесса.

Таблица 1.3 – Особенности математических методов АСЭС на основе ВИЭ

Методы АСЭС	Разработчик, год	Преимущества	Недостатки	Ссылки на литературу с использованием метода
Генетический алгоритм	Джон Холлади, 1975 г.	<ul style="list-style-type: none"> - эффективность нахождения глобального оптимума; - подходит для сложных задач с большим числом элементов. 	<ul style="list-style-type: none"> - не гарантирует обнаружения глобального решения за приемлемое время; - относительная сложность при кодировании алгоритма. 	[56–57, 59–60]
Метод роя частиц	Джеймс Кеннеди, Рассел Эберхарт, 1995 г.	<ul style="list-style-type: none"> - имеет довольно простой алгоритм, который легко можно реализовать в программной среде; - быстро находит глобальный оптимум за короткое время; - при использовании метода требуется меньше параметров. 	не подходит для систем с большим числом элементов.	[57, 61–62]
Моделируемый отжиг	Кирк Патрик, начало 80-х гг.	<ul style="list-style-type: none"> возможность избежать локальных минимумов оптимизируемой функции. 	<ul style="list-style-type: none"> - относительно низкая производительность для нахождения глобального оптимума по сравнению с методами «генетического алгоритма» и «роя частиц»; - не подходит для систем с большим числом элементов АСЭС. 	[63]

«Метод роя частиц». Процесс оптимизации на основе «метода роя частиц» представляет собой процедуру стохастической оптимизации на основе популяции. Каждое потенциальное решение в популяции называется частицей. Координаты каждой частицы представляют собой возможное решение, связанное с положением и вектором скорости. Каждая частица инициализируется случайной скоростью и пролетает через пространство поиска. На каждой итерации частица движется к оптимальному решению, благодаря своей текущей скорости, личному наилучшему решению, и глобальному наилучшему решению, полученному всеми частицами. Процедура оптимизации будет продолжаться до тех пор, пока не будут достигнуты заранее определенные критерии завершения.

«Моделируемый отжиг». На каждой итерации случайным образом выбирается ход. Ход принимается, если он приводит к решению с лучшим значением целевой функции, чем текущее решение. В противном случае ход принимается с вероятностью, которая зависит от ухудшения значения целевой функции на основе «критериев мегаполиса».

Если новое решение лучше, чем текущее лучшее решение в популяции, то новое решение принимается. С другой стороны, если это новое решение имеет худшее значение целевой функции, чем текущее лучшее решение в популяции, то новое решение также может быть принято и рассмотрено для новой популяции на следующей итерации в зависимости от разницы между его значением и лучшим значением целевой функции.

При оптимизации АСЭС на основе ВИЭ в зарубежных и отечественных научных работах встречаются методы «линейного программирования», «метод нейронных сетей» и др. [57,64–65].

Выполненный обзор математических методов оптимизации показал, что для СДУ, состоящей из трех электрогенерирующих элементов, наиболее подходящим является «метод роя частиц». Метод имеет простой алгоритм реализации в программной среде, при этом он быстро находит глобальный оптимум за короткое время по сравнению с другими методами. Поэтому в диссертационной

работе оптимизацию параметров и структуры СДУ предлагается осуществить «методом роя частиц».

СДУ характеризуется сложностью на этапе выбора состава электрогенерирующих элементов. При этом ФЭП, АБ и ДГ должны иметь суммарную мощность (емкость), соответствующую нагрузке потребителя электрической энергии и интенсивности СИ. По этой причине моделирование математических методов в ПВК позволяет значительно упростить и сократить процесс проектирования СДУ.

Существует большое количество программ моделирования АСЭС с использованием СДУ. Однако в диссертационной работе для анализа отобраны 7 наиболее известных программ моделирования СДУ [66].

PV-SPS

Программа разработана австралийским деловым советом по устойчивой энергетике на электронных таблицах Excel. Программа дает три варианта состава ФЭП по среднегодовым и среднемесячным значениям интенсивности СИ, характерных для лета и зимы, и установленной мощности ДГ, соответствующего выбранному режиму работы системы. Несмотря на то, что при вводе берутся всего лишь два графика нагрузки и данные о выработке электрической энергии, на выходе программа дает хорошее представление о производительности СДУ в течение года.

Одной из особенностей PV-SPS является ввод двух групп нагрузок, характерных для лета и зимы. При этом для каждого месяца

указываются региональные факторы сезонных нагрузок и данные об интенсивности СИ и температуре окружающей среды для четырех различных районов Австралии. Программа выполняет расчеты только по австралийским отраслевым стандартам для внесетевых систем.

RETScreen

Программа, основанная на электронных таблицах Excel, разработана Министерством природных ресурсов Канады и поддерживает базовые расчеты параметров и структуры СДУ. RETScreen отличается быстрым и простым вводом, база имеет климатические данные для более чем 6000 наземных станций (ежемесячные данные об интенсивности СИ и температуры за год). Кроме этого, можно получить климатические данные для любой выбранной географической точки из базы «National aeronautics space administration» (NASA). Программа предлагается на более чем 30 языках и включает в себя широкий спектр дополнительных инструментов, охватывающих другие ВИЭ [67].

*PV * SOLProfessional*

Программа, разработанная в Германии, рассчитывает выработку электрической энергии СДУ и экономическую эффективность. При вводе данных о нагрузке потребителя можно ввести отдельные графики нагрузки или ограничиться годовым потреблением электрической энергии и выбором кривой нагрузки. Результаты моделирования выводятся в виде графиков (характерные кривые для конкретных параметров) или таблиц с возможностью вывода до восьми различных переменных одновременно [68].

PVsyst

Программа моделирования с временным шагом, разработанная в Женевском университете Швейцарии, оптимизирует СДУ в зависимости от интенсивности СИ и нагрузки потребителя.

Графики нагрузки могут быть заданы различными способами: индивидуальные входы, создание профиля нагрузки, вероятности определенных значений мощности, импорт данных и дифференциация отдельных периодов. Выходные параметры результатов представлены в виде характерных кривых конкретных параметров [69].

Hybrid2

Программа моделирования, разработанная Национальной лабораторией возобновляемой энергии Министерства энергетики США в сотрудничестве с Университетом Массачусетса, является одной из первых программ в этой области. Она была реализована для анализа АСЭС с несколькими источниками энергии (ФЭП, ДГ, ВЭУ) и предлагает оптимальную структуру и экономическую оценку АСЭС. Программы отличаются тем, что длительность расчета находится в промежутке с интервалом от 10 минут до 1 часа [57, 70].

PV-DesignPro (версия 6.0)

Программа моделирования временных шагов, разработанная в США, предназначена для АСЭС, в состав которого входит ФЭП и ВЭУ. Программа оптимизирует состав АСЭС, включает в себя экономический анализ, расчет выработки электрической энергии элементов.

Наряду с достаточно полной внутренней климатической базой данных о температуре окружающей среды, интенсивности СИ и скорости ветра имеется также база данных, включающая более 400 различных ФЭП [71].

HOMER (Hybrid Optimisation Model for Electric Renewables)

Разработанная американской национальной лабораторией ВИЭ, программа предназначена для сравнения и выбора способа производства энергии за счет ВИЭ в энергосистемах малой мощности. На рисунке 1.7 представлен интерфейс программы.

Программа производит расчет стоимости за период эксплуатации (стоимости установки, затрат на дальнейшую эксплуатацию) и рисков, связанных с изменчивостью погодных условий, позволяя проектировщику сравнить множество различных вариантов конструкции энергосистемы. При помощи комплекса «HOMER» можно рассчитать автономную энергосистему, которая может содержать различные комбинации источников энергии (ФЭП,

ветрогенераторы, микро-ГЭС, биогазовые установки, ДВС, микротурбины, топливные элементы, АКБ и водородные источники) [72, 73].

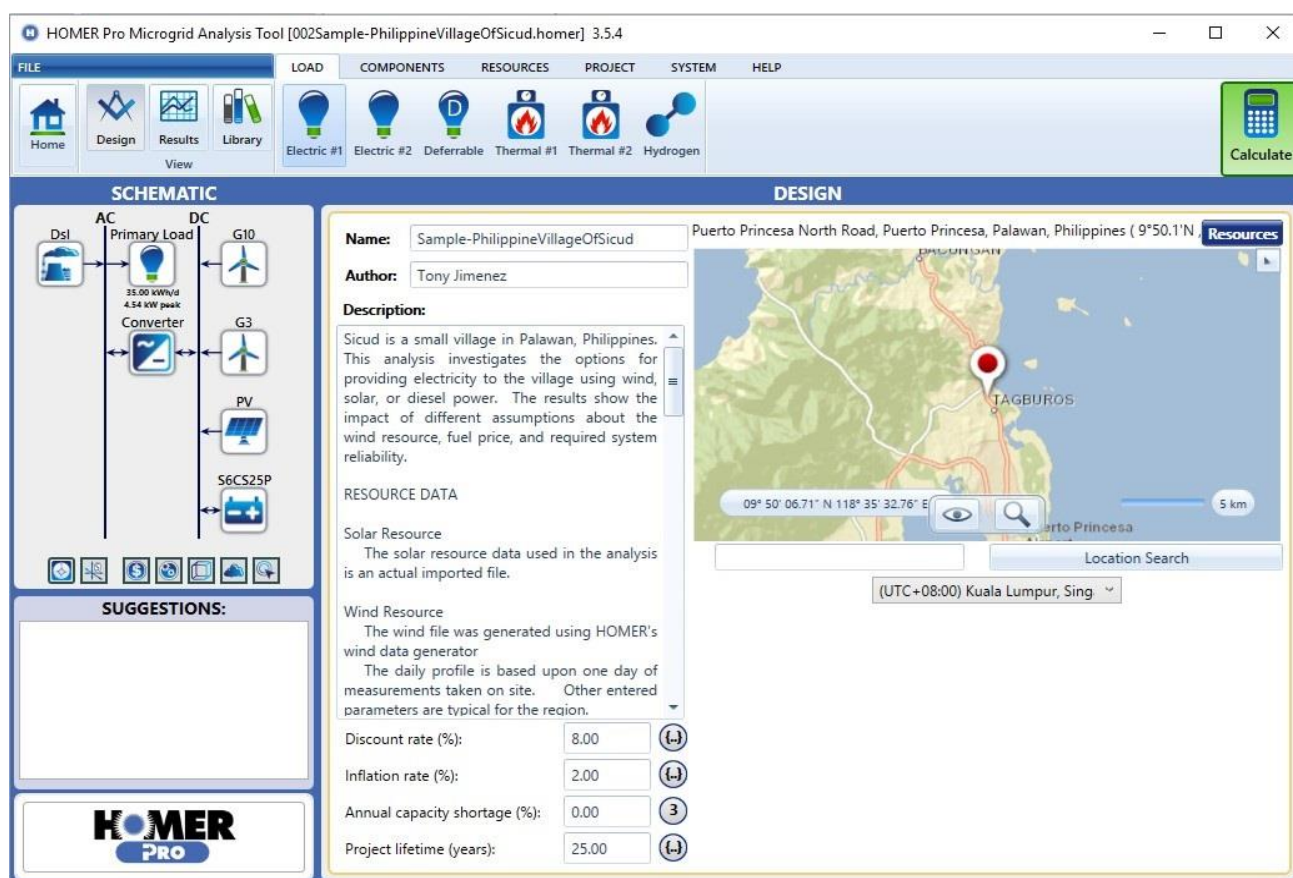


Рисунок 1.7 – Интерфейс программы моделирования АСЭС на основе ВИЭ «Homer»

Программа имеет в своей структуре 3 основных модуля (моделирование, оптимизация и анализ чувствительности). Результаты проектирования в программе «HOMER» отображаются в виде таблиц и графиков, облегчая тем самым сравнение различных конфигураций энергосистемы, и позволяя определить экономические и технические преимущества различных систем. Информация о технологических вариантах, затратах и доступности ресурса при проектировании можно скачать с программы в виде отдельного файла [57].

Характерные особенности, описанных ПВК для оптимизации АСЭС на основе СДУ, представлены в таблице 1.4.

Таблица 1.4 – Обзор программного обеспечения и моделирования АСЭС на основе СДУ

№	Программа, версия	Страна	Языковые варианты	Элементы	Наличие база данных интенсивности СИ	Экономический анализ
1	PV-SPS, 3.0	Австралия	Англ.	ФЭП+ДГ+АБ	Только для 4 районов Австралии	нет
2	RETScreen, 4	Канада	Более 30	ФЭП+ДГ+АБ+ВИЭ	600 станций, NASA	есть
3	PV*Sol, 3.0	Германия	5	ФЭП+ДГ+АБ	NASA	есть
4	PV syst, 4.33	Швейцария	5	ФЭП+ДГ+АБ+др. ВИЭ	NASA	есть
5	Hybrid2, 1.3c R3	США	Англ.	ФЭП+ДГ+АБ+ВЭУ	NASA	есть
6	PV-DesignPro, 6.0	США	Англ.	ФЭП+ДГ+АБ+ВЭУ	NASA	есть
7	НOMER, 2.67	США	Англ.	ФЭП+ДГ+АБ+ др. ВИЭ	NASA	есть

Рассмотренные ПВК выполняют оптимизацию для любой географической точки на земле по базе данных NASA и по графикам нагрузки потребителя. В программе «PV-DesignPro» наряду с достаточно полной внутренней климатической базой данных о температуре окружающей среды, интенсивности СИ и скорости ветра имеется также база данных, включающая более 400 различных типов ФЭП. В ПВК при оптимизации предусмотрена экономическая оценка полученных вариантов (за исключением «PV-SPS»). Программы «HOMER» и «Hybrid2» оптимизируют состав не только АСЭС на основе СДУ, но и с другими видами ВИЭ, что усложняет процесс оптимизации ПВК.

Однако в рассмотренных ПВК недостаточно полно учитывается влияние:

- географических и климатических факторов места установки ФЭП, технических и механических характеристик ФЭП на выходные энергетические характеристики ФЭП;
- изменений реальных энергетических характеристик ФЭП и графиков нагрузки потребителя на режимы работы электрогенерирующих элементов СДУ и технико-экономические показатели СДУ.

Выводы по главе 1

1. Представлены особенности и пути совершенствования АСЭС на примере Республики Тыва. Приведены характеристики ДЭС в поселках, удельная установленная мощность на одного человека, ежегодные значения потребления дизельного топлива и выработки электрической энергии.

2. Анализ местных возобновляемых энергоресурсов на территории Республики Тыва позволил выбрать и обосновать возможность использования ФЭП совместно с накопителями энергии в АСЭС. Выполнен анализ методической и нормативной базы для решения задач по вводу СДУ.

3. Приведено описание структурной схемы и элементной базы СДУ. Обоснована необходимость разработки математической модели ФЭП, учитывающей интенсивность СИ, температуру окружающей среды, технические характеристики и способ ориентации ФЭП в зависимости от географической широты места расположения ФЭП, времени года и суток.

4. Выполнен обзор математических методов оптимизации СДУ и ПВК на их основе, который показал, что для выбора оптимального состава СДУ наиболее приемлемым является метод роя частиц. Обоснована необходимость разработки ПВК для моделирования и оптимизации СДУ.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЫХОДНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

2.1 Методы получения данных о распределении величины интенсивности СИ на территории России

В настоящее время регулярные измерения интенсивности СИ ведутся в менее 130 метеостанциях на территории России (рисунок 2.1).

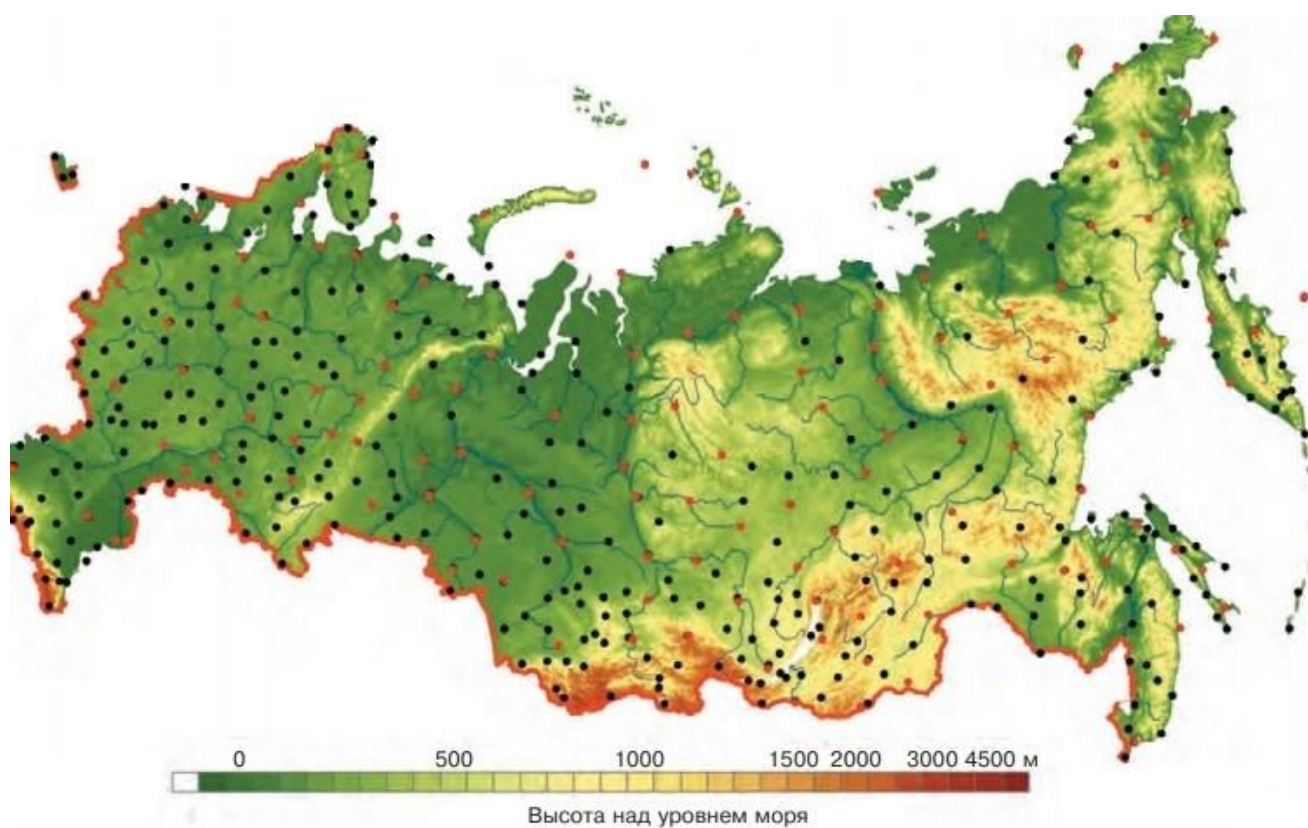


Рисунок 2.1 – Аэрологическая сеть России по данным Росгидромета

В России расстояние между метеостанциями составляет в среднем около 500 км. Однако если учесть неравномерную плотность размещения станций, расстояние между станциями в азиатской части России в среднем достигает

порядка 1000 км. Согласно результатам исследований, ведущего Российского научного центра в области актинометрии – Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова данные измерений могут экстраполироваться на расстоянии не более 130 км от метеостанции. Таким образом, имеющаяся в настоящее время сеть метеостанций на территории России для получения надежных данных об интенсивности СИ явно недостаточна [74].

Как правило, на основе обработки результатов многолетних метеорологических наблюдений на метеостанциях основным источником исходной актинометрической информации являются климатические справочники [12, 24, 74–76] и базы данных [77–78].

Для обеспечения более плотного покрытия территории России наряду с данными многолетних измерений интенсивности СИ на метеостанциях России и ряде известных баз данных оправданным считается использование базы данных Национального агентства по авионавигации и исследованию космического пространства США NASA на основе многолетних спутниковых измерений радиационного баланса поверхности земного шара (включая территорию России) и современных моделей распространения излучения в атмосфере (рисунок 2.2) [79, 80].



Рисунок 2.2 – Использованные актинометрические станции России при проведении верификации базы NASA

В работе [81] с учетом обширности и высокоширотного расположения большей части территории России на 50 метеостанциях России, расположенных в различных регионах, данные NASA сравнивались с прямыми многолетними измерениями интенсивности СИ для разных периодов года. Для большинства регионов России по средним суммам интенсивности СИ погрешность данных NASA не превысила 15 %.

По спутниковым наблюдениям NASA разработана электронная база климатической информации для всей территории России, которая представляет целый программный комплекс (рисунок 2.3) [81].

Просмотр данных

Область: Нас.Пункт: Dagestan Derbent

Широта: 42.86 Долгота: 48.28

NASA	Температура воздуха С	Относительная влажность %	Дневная сумма солнечной радиации kWh/m2/day			Скорость ветра m/s	
			Суммарная на горизонтальную поверхность	На оптимально-ориентированную поверхность	Прямая на следящую поверхность	на 10 м	на 50 м
Январь	3.0	72.4	1.40	n/a	n/a	6.3	n/a
Февраль	2.4	72.0	2.12	n/a	n/a	6.5	n/a
Март	4.7	73.8	3.28	n/a	n/a	6.2	n/a
Апрель	10.3	72.2	4.57	n/a	n/a	5.8	n/a
Май	15.1	69.4	5.94	n/a	n/a	5.6	n/a
Июнь	20.2	66.3	6.53	n/a	n/a	5.5	n/a
Июль	23.3	64.1	6.52	n/a	n/a	5.8	n/a
Август	23.2	63.1	5.86	n/a	n/a	5.8	n/a
Сентябрь	19.3	66.0	4.26	n/a	n/a	5.7	n/a
Октябрь	14.2	69.7	2.83	n/a	n/a	5.9	n/a
Ноябрь	8.7	72.7	1.86	n/a	n/a	6.4	n/a
Декабрь	4.6	71.8	1.25	n/a	n/a	6.4	n/a
Среднегодовое	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Источник	NASA	NASA	NASA	n/a	n/a	NASA	n/a

Высота над уровнем моря: 304.00

Печать Выход

Рисунок 2.3 – Окно программы в режиме просмотра данных по географическим координатам

Для просмотра данных из базы NASA необходимо ввести географические координаты поселка. Данные выводятся в файл, содержащий для каждой точки

географические широту и долготу, выводимую величину, осредненную за год, лето, теплое и холодное полугодия, а также среднемесячные значения величины.

Следует отметить, что данные о приходе интенсивности СИ в различные промежутки времени свидетельствуют о ее значительной изменчивости в течение года, сезона и суток. Например, изменение интенсивности СИ в течение дня и ее зависимость от суточного хода облачности влияет на производительность ФЭП и на режимы работы СДУ [12].

База данных NASA содержит среднемесячные значения числа ясных дней, дневных сумм интенсивности СИ, приходящей на различные плоскости, относительной и абсолютной влажности, давления воздуха, количества осадков, температур окружающей среды, скорости ветра.

Однако при проектировании СДУ необходимо иметь часовые данные о поступлении СИ. Поэтому при отсутствии часовых данных по поступлению СИ в работах [82–85] применяются косвенные методы расчета, основанные на астрономических параметрах Солнца. При этом выбор методики расчета интенсивности СИ определяется по имеющимся исходным данным местности.

2.2 Методика оценки интенсивности СИ на горизонтальную поверхность

Интенсивность СИ, проходя сквозь слои безоблачной атмосферы, ослабляется вследствие процессов релеевского и аэрозольного рассеяния и поглощения озоном, водяным паром и газами (кислорода, углекислого газа и азота). Поэтому для корректного расчёта интенсивности СИ на горизонтальную поверхность методика должна быть выполнена с учетом всех процессов, происходящих с СИ при его прохождении через атмосферу [86].

В настоящее время на территории Республики Тыва единственная актинометрическая станция № 36055 расположена в г. Кызыл. Для условий

Республики Тыва проанализирована возможность использования различных методик оценки интенсивности СИ, учитывающих процессы поглощения и рассеяния излучения в зависимости от исходных данных. Сравнительный анализ позволил за основу выбрать методику Берда [83] с минимальной погрешностью расчётных и наблюдаемых значений не более 9 % для актинометрической станции, расположенной в г. Кызыл. Методика позволяет учитывать все основные процессы поглощения и рассеяния излучения при минимальных исходных данных [83].

Исходные данные для расчета:

- географическая долгота λ и широта φ местности;
- атмосферное давление $P_{\text{возд}}$, ГПа [12];
- значение альbedo подстилающей поверхности r_s [12];
- наблюдаемые часовые значения интенсивности сумм прямого $E_{\text{гор}}^{\text{пр}}$ и рассеянного $E_{\text{гор}}^{\text{рас}}$ СИ, поступающего на горизонтальную поверхность, кВт/м² [12].

Последовательность расчета интенсивности СИ:

Угол солнечного склонения δ , град.:

$$\delta = 23,5 \sin \left[360 \cdot \frac{284 + n}{365} \right], \quad (2.1)$$

где n – порядковый номер дня (с 1 января).

Часовой угол, ω , град.:

$$\omega = 15 \cdot (t + t_c - 12), \quad (2.2)$$

где t_c , час – среднее время по Гринвичу; t , час – исследуемое время.

Косинус зенитного угла Солнца $\cos \theta$, град.:

$$\cos \theta = \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \varphi \cdot \sin \delta. \quad (2.3)$$

Расчет интенсивности прямого СИ при чистом небе с учетом поправочных коэффициентов для условий Тывы $E_{\text{гор}}^{np}$, Вт/м² [85]:

$$E_{\text{гор}}^{np} = E \cdot \cos \theta \cdot k_{np} \cdot k_{II}, \quad (2.4)$$

где E , Вт/м² – нормальная плотность потока СИ в космосе ($E = 1367$ Вт/м²); $k_{np}^{II} = k_R \cdot k_{O_3} \cdot k_{\text{газ}} \cdot k_{H_2O} \cdot k_A$ – среднемесячный коэффициент пропускания процессов ослабления СИ в атмосфере Земли; k_R и k_A – коэффициенты релеевского и аэрозольного рассеяния, k_{O_3} , $k_{\text{газ}}$, k_{H_2O} – коэффициенты поглощения СИ озоном, газовой смесью (O₂, N₂, CO₂) и парами воды.

Расчет коэффициентов ослабления прямого СИ в чистой атмосфере, производится по формулам [85]:

– коэффициент релеевского рассеяния

$$k_R = \exp(-0.0903(M^*)^{0.84} \cdot (1 + M^* - M^{*1.01})); \quad (2.5)$$

– коэффициент аэрозольного рассеяния

$$k_A = \exp(-k'_A{}^{0.873} \cdot (1 + k'_A - k'_A{}^{0.7088}) \cdot M^*)^{0.9108}, \quad (2.6)$$

где $k'_A = 1.832 \cdot \beta$;

– коэффициент поглощения СИ озоном

$$k_{O_3} = 1 - 0.1611 \cdot h_{O_3} \cdot M^* \cdot (1 + 139.48 \cdot h_{O_3} \cdot M^*)^{-0.3035} - 0.002715 \cdot h_{O_3} \cdot M_i^* \cdot (1 + 0.044 \cdot h_{O_3} \cdot M^* + 0.0003 \cdot (h_{O_3} \cdot M^*)^2)^{-1}, \quad (2.7)$$

где $h_{O_3} = 0,32$, см – толщина озонового слоя при нормальных температуре и давления;

– коэффициент поглощения СИ газовой смесью:

$$k_{газ} = \exp(-0.0127 \cdot M^{*0.26}); \quad (2.8)$$

– коэффициент поглощения СИ водяным паром:

$$k_{H_2O} = 1 - 2.4959 \cdot d_{H_2O} \cdot M^* \cdot ((1 + 79.034 \cdot d_{H_2O} \cdot M^*)^{0.6828} + 6.385 \cdot d_{H_2O} \cdot M^*)^{-1}, \quad (2.9)$$

где d_{H_2O} , г/см² – содержание водяного пара в вертикальном столбе атмосферы (для зимы $d_{H_2O} = 1,3$ г/см², для лета $d_{H_2O} = 3,0$ г/см²) [6].

Интенсивность рассеянного СИ на горизонтальную поверхность $E_{гор}^{pac}$, Вт/м² [86]:

$$E_{гор}^{pac} = E \cdot \cos \theta \cdot k_{pac} \cdot k_{pac}^II. \quad (2.10)$$

– коэффициент ослабления СИ в атмосфере Земли [74]:

$$k_{pac}^II = k_{O_3} \cdot k_{газ} \cdot k_{H_2O} \cdot k_{\Lambda A} \cdot (0,5 \cdot (1 - k_R) + B_a \cdot (1 - k_{AS})) / (1 - M^* + M^{*1.02}), \quad (2.11)$$

где $k_{\Lambda A}$ – коэффициент аэрозольного рассеяния [30]; k_{AS} – коэффициент рассеяния частицами сухого воздуха; B_a – отношение рассеянного прямого излучения к общему рассеянному излучению [6, 87]:

$$B_a = 0,5 \cdot (1 + \cos \theta). \quad (2.12)$$

Коэффициенты для расчета плотности потока рассеянного СИ:

- коэффициент поглощения СИ частицами аэрозоля:

$$k_{\Lambda A} = 1 - 0,1 \cdot (1 - M^* + M^{*1.06}) \cdot (1 - k_A); \quad (2.13)$$

- коэффициент рассеяния СИ частицами аэрозоля [6]:

$$k_{AS} = k_A / k_{\Lambda A}; \quad (2.14)$$

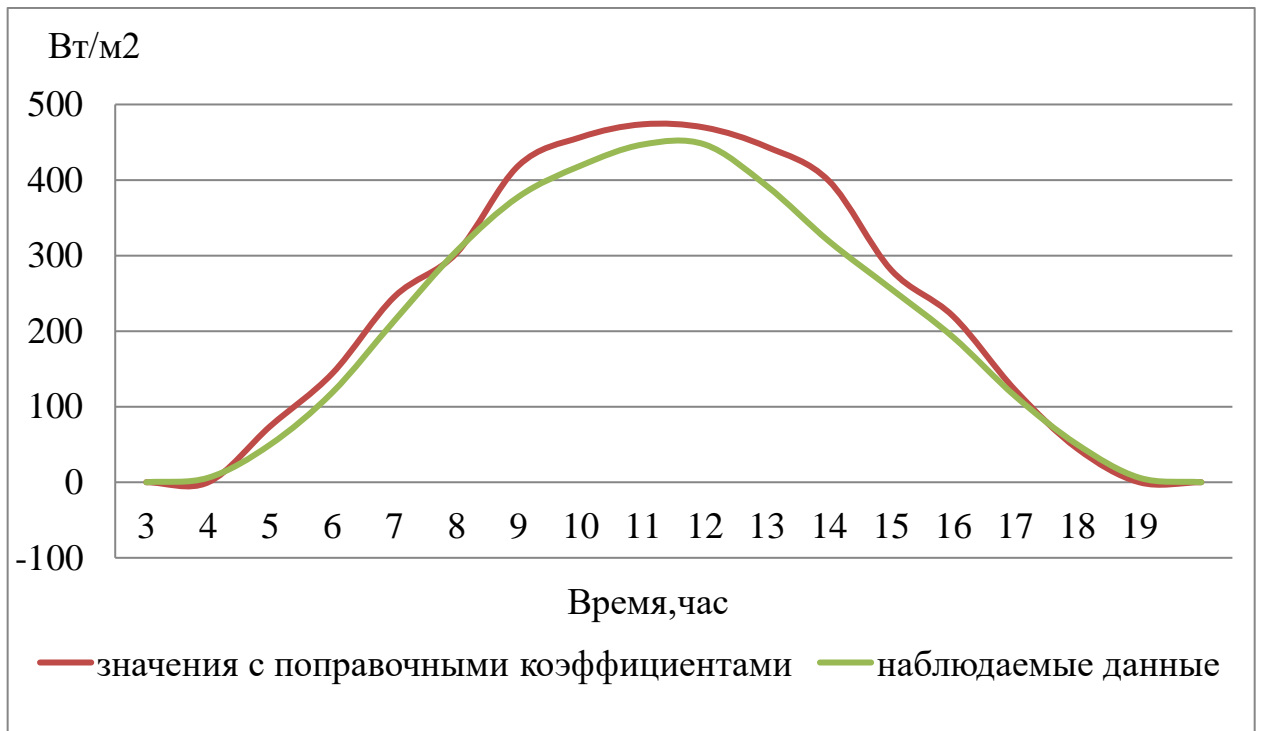
Суммарная интенсивность СИ на горизонтальную поверхность $E_{гор}$, Вт/м² [86]:

$$E_{гор} = (E_{гор}^{np} + E_{гор}^{pac}) / (1 - r_3 \cdot r_a), \quad (2.15)$$

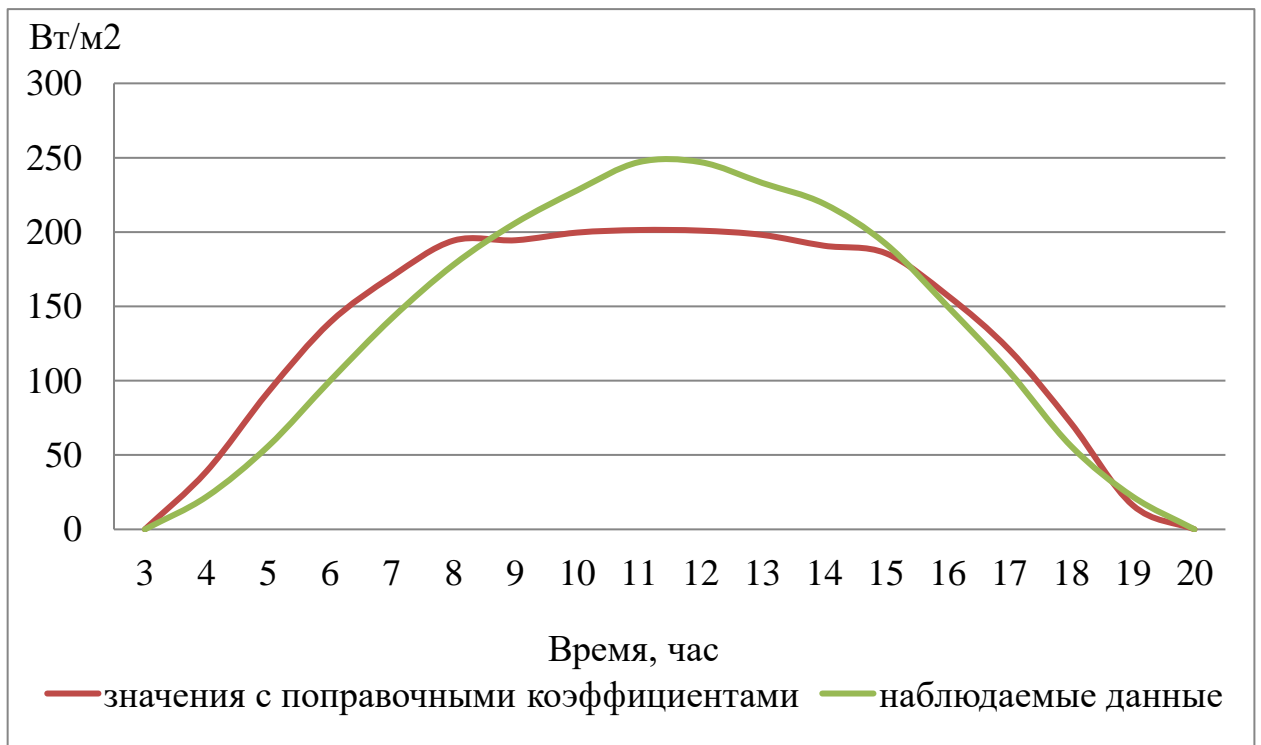
где r_3 – значение альbedo подстилающей поверхности, r_a – значение альbedo атмосферы:

$$r_a = 0.0685 + (1 - B_a) \cdot (1.0 - k_{AS}) \quad (2.16)$$

На рисунках 2.4, 2.5 представлены наблюдаемые данные по изменению сумм интенсивности прямого и диффузного СИ на горизонтальную поверхность с актинометрической станции, расположенной в г. Кызыле 15 июля и 15 января 2020 г. и значения, полученные расчетным путем с предлагаемыми поправочными коэффициентами.



а)

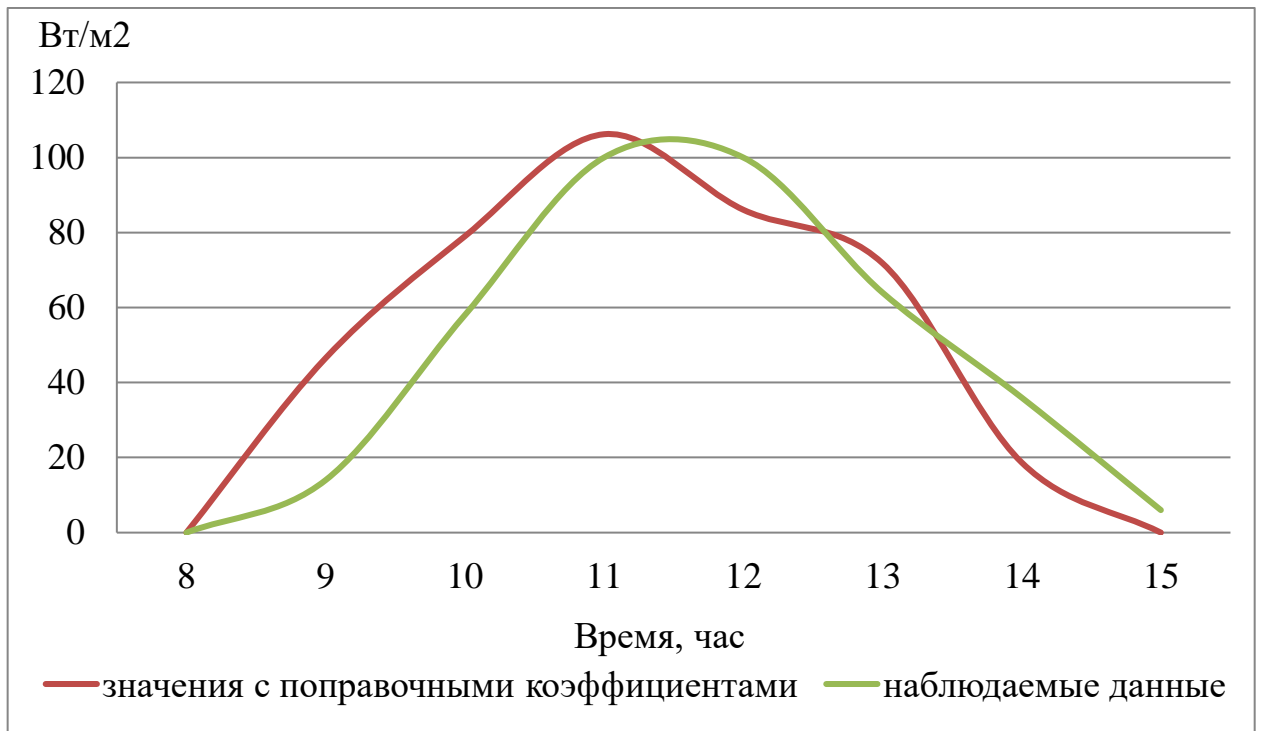


б)

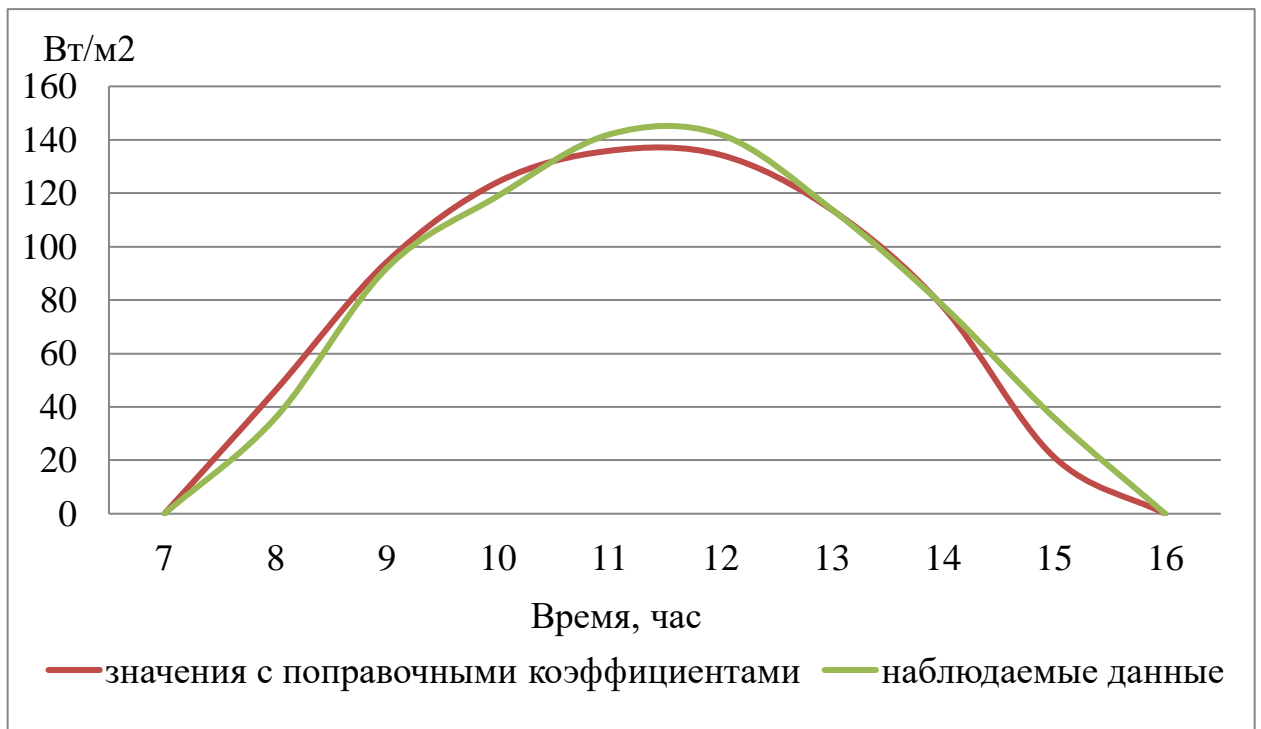
Рисунок 2.4 – Изменение сумм интенсивности СИ на горизонтальную поверхность для актинометрической станции в г. Кызыле 15 июля 2020 г.:

а) прямое СИ

б) диффузное СИ



а)



б)

Рисунок 2.5 – Изменение сумм интенсивности СИ на горизонтальную поверхность для актинометрической станции в г. Кызыле 15 января 2020 г.:

а) прямое СИ

б) диффузное СИ

Для повышения точности расчётов в методику введены поправочные коэффициенты, действительные на территории Республики Тыва и полученные по минимальной сумме квадратов расхождения расчётных и наблюдаемых данных актинометрической станции для г. Кызыл. Поправочные коэффициенты для прямого СИ в течение года $k_{np} = 0,61$, $k_{гор}^{np} = 0,61$ для рассеянного СИ $k_{рас}^{Л} = 1,13$ – для зимы, $k_{рас}^3 = 0,89$, $k_{гор(Л)}^{диф} = 0,89$ – для лета.

Сопоставление расчетных значений интенсивности СИ с наблюдаемыми данными актинометрической станции показало удовлетворительную сходимость с погрешностью, не превышающей 10–15 %.

2.3 Метод расчёта выходных энергетических параметров ФЭП

Основным параметром, определяющим техническое качество ФЭП, принято считать КПД ФЭП. Для получения КПД ФЭП подвергают облучению при Standard test condition (STC) (поток солнечной энергии 1000 Вт/м^2 , температура $+ 25 \text{ }^\circ \text{C}$ и солнечный спектр на широте 45 град. при атмосферной массе, равной $1,5$) снимают полностью вольтамперные характеристики. Точка, в которой произведение тока и напряжения максимально, принято считать точкой максимальной мощности, отдаваемой ФЭП на нагрузку [88].

КПД ФЭП η , % [87]:

$$\eta = \frac{P}{S}, \quad (2.17)$$

где $S, \text{ м}^2$ – площадь ФЭП.

В листах технических характеристик указываются мощность ФЭП при STC, напряжение в точке максимальной мощности, напряжение холостого хода, ток в

точке максимальной мощности, ток короткого замыкания, тип и размеры ФЭП [88].

Однако ФЭП обладает рядом технических и механических характеристик. Причем в зависимости от географических и климатических факторов, влияние данных характеристик ФЭП на конечную производительность может различаться. Этим характеристикам потребители и разработчики ФЭП не придают особого значения и не учитывают их при покупке или разработке, а зачастую эти данные не указываются в листах технических характеристик [88].

Поэтому под совершенствованием математической модели ФЭП предполагается учет влияния перечисленных характеристик и факторов на выходные энергетические параметры ФЭП.

Эквивалентная схема ФЭП учитывает последовательное и параллельное (шунтирующее) сопротивление солнечных элементов ФЭП [54]. Последовательное сопротивление включает сопротивление самого полупроводникового материала, из которого изготовлен элемент, переходное сопротивление полупроводник – металл, сопротивление контактов. Шунтирующее сопротивление образуется за счет наличия обратного сопротивления $p-n$ перехода, различных проводящих пленок или загрязнений. Так как величина шунтирующего сопротивления солнечных элементов довольно велика, токовыми потерями, связанными с ним, можно пренебречь.

В основу математической модели заложена классическая модель ФЭП с $p-n$ переходом, позволяющая определить зависимость напряжения от тока и не учитывающая наличия шунтирующего сопротивления и токовых потерь на нем U , V :

$$U = U_{XX}^{STC} - I^{\phi} \cdot R - U^T \cdot \ln\left(1 + \frac{U_{XX}^{STC}}{U^T}\right), \quad (2.18)$$

где I^{ϕ} , А – фототок ФЭП; U_{XX}^{STC} , В – напряжение ХХ ФЭП при STC; R , Ом – внутреннее (последовательное) сопротивление ФЭП.

Температурное напряжение ФЭП U^T , В [6]:

$$U_i^T = \frac{k \cdot A \cdot T}{q}, \quad (2.19)$$

где k , Дж/К – постоянная Больцмана; q , Кл – заряд электрона; A – безразмерный параметр кривизны вольтамперной характеристики ФЭП; T , К – температура ФЭП.

Ток ФЭП I , А:

$$I = I^\phi - I^0, \quad (2.20)$$

где I^0 , А – обратный ток насыщения ФЭП.

В реальных условиях величины ФЭП I^0 , I^ϕ , U_{XX}^{STC} изменчивы в зависимости от параметров окружающей среды. Сильное воздействие на выходную мощность ФЭП оказывают интенсивность СИ и температура окружающей среды. Интенсивность СИ напрямую влияет на фотоэлектрический ток ФЭП, а температура окружающей среды оказывает воздействие на температуру ФЭП, значительное увеличение которой уменьшает выходную мощность, вследствие линейного падения напряжения холостого хода.

Тогда ток обратного тока насыщения I^0 , А:

$$I^0 = \frac{I_{K3}^{STC} + k_I \cdot (T - T^{STC})}{\left(\exp\left(\frac{U_{XX}^{STC} + k_U \cdot (T - T^{STC})}{U^T} \right) - 1 \right)}, \quad (2.21)$$

Фотоэлектрический ток ФЭП:

$$I^\phi = \left(\frac{E}{E^{STC}} \right) \cdot (I_{K3}^{STC} + k_I \cdot (T - T^{STC})), \quad (2.22)$$

где T^{STC} , °C – температура при STC; T , °C – температура окружающей среды; I_{K3}^{STC} , А – ток КЗ ФЭП при STC; k_I и k_U , K⁻¹ – температурные коэффициенты тока и напряжения.

На значение интенсивности СИ, существенное влияние оказывает способ ориентации ФЭП [30, 39, 45-46, 88, 89].

Интенсивность СИ на наклонную поверхность $E_{накл}$, Вт/м²:

$$E_{накл} = E_{гор}^{пр} \cdot \frac{\cos \xi}{\cos \theta} + E_{гор}^{рас} \cdot \frac{(1 + \cos \beta)}{2} + E_{гор} \cdot \frac{(1 - \cos \beta)}{2}, \quad (2.23)$$

где β , град. – угол наклона поверхности; $\cos \xi$, град. – косинус угла падения лучей на наклонную поверхность [86]:

$$\cos \xi = \cos(\varphi - \beta) \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin(\varphi - \beta) \cdot \sin \delta. \quad (2.24)$$

Интенсивность СИ для следящей за Солнцем поверхности $E_{след}$, Вт/м²:

$$E_{след} = \frac{E_{гор}^{пр}}{\cos \theta} + E_{гор}^{рас} \cdot \frac{(1 + \cos \beta^*)}{2} + E_{гор} \cdot \frac{(1 - \cos \beta^*)}{2}. \quad (2.25)$$

Для следящей поверхности $\beta^* = \arccos \theta$.

С учетом влияния географических и климатических факторов места установки ФЭП, технических и механических характеристик ФЭП математическую модель ФЭП в общем виде можно представить следующей системой выражений:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 E_{\text{след}}^{\text{полн}} = \frac{E_{\text{гор}}^{\text{np}}}{\cos \theta} + E_{\text{гор}}^{\text{diff}} \frac{(1 + \cos \theta)}{2} + E_{\text{гор}}^{\text{полн}} \frac{(1 - \cos \theta)}{2}; \\
 E_{\text{накл}}^{\text{полн}} = E_{\text{гор}}^{\text{np}} \frac{\cos \xi}{\cos \theta} + E_{\text{гор}}^{\text{diff}} \frac{(1 + \cos \beta)}{2} + E_{\text{гор}}^{\text{полн}} \frac{(1 - \cos \beta)}{2}; \\
 I^{\Phi} = \left(\frac{E^{\text{полн}}}{E^{\text{STC}}} \right) \cdot (I_{\text{КЗ}}^{\text{STC}} + k_I \cdot (T - T^{\text{STC}})), \\
 I^{\circ} = \frac{I_{\text{КЗ}}^{\text{STC}} + k_I \cdot (T - T^{\text{STC}})}{\left(\exp\left(\frac{U_{\text{XX}}^{\text{STC}} + k_U \cdot (T - T^{\text{STC}})}{U^T} \right) - 1 \right)}, \\
 I = I^{\Phi} - I^{\circ}, \\
 U = U_{\text{XX}}^{\text{STC}} - I^{\Phi} \cdot 0,445112 - U^T \cdot \ln\left(1 + \frac{U_{\text{MM}}^{\text{STC}}}{U^T}\right), \\
 P = I \cdot U.
 \end{array} \right. \quad (2.26)$$

По предложенной математической модели определены вольтамперные и вольтваттные характеристики монокристаллической ФЭП «SilaSolar 200 Вт». Технические характеристики ФЭП при STC представлены в таблице 2.1 [7].

Таблица 2.1 – Технические характеристики ФЭП «SilaSolar 200 Вт»

Максимальная мощность, Вт	200
Максимальное напряжение, В	34,4
Напряжение холостого хода, В	43,2
Максимальный ток, А	5,82
Ток короткого замыкания, А	6,39
Коэффициент тока, К ⁻¹	0,06
Коэффициент напряжения, К ⁻¹	-0,34

В разработанной математической модели ФЭП приняты следующие допущения:

- $R_{\text{П}}$ не зависит от параметров окружающей среды;

– $A=Const$ и $R=Const$ согласно [47];

– не учитываются внутренние токовые потери и спектральная чувствительность ФЭП [89, 90].

На рисунках 2.6 и 2.7 представлены семейства вольтамперных и вольтваттных характеристик ФЭП «SilaSolar 200 Вт» для $T^{STC}=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ при интенсивностях СИ 1000, 800, 600, 400 и 200 Вт/м².

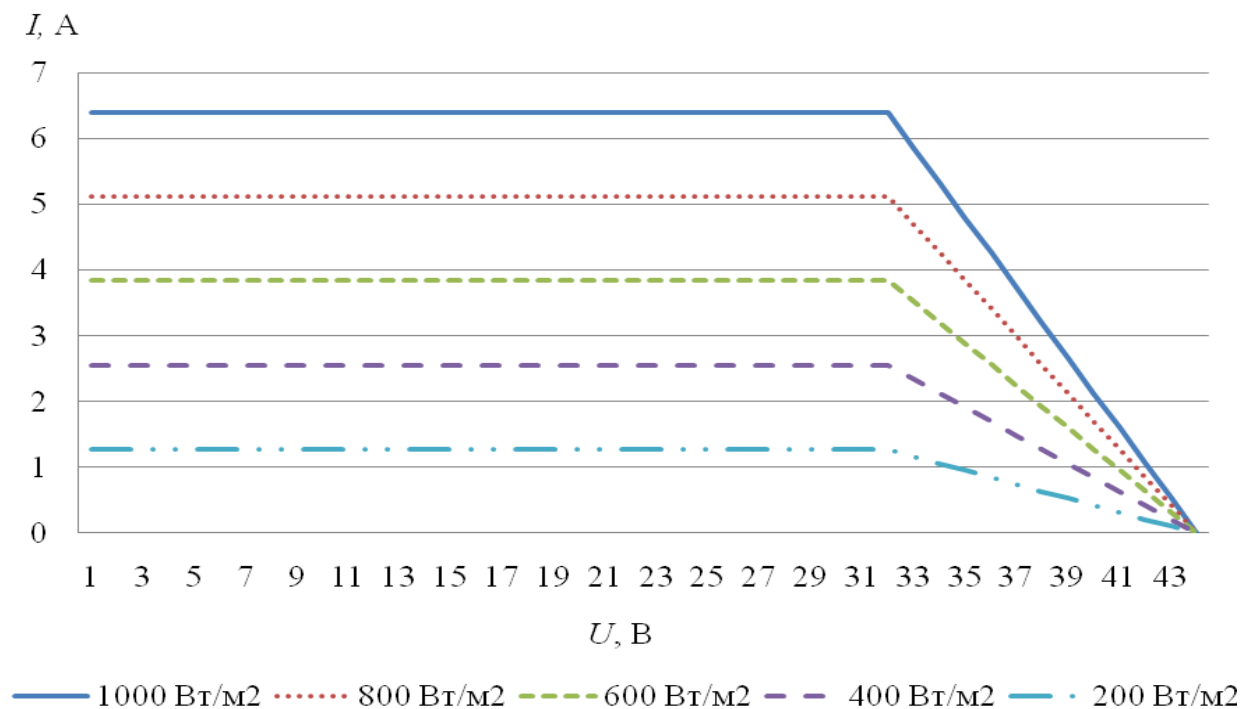


Рисунок 2.6 – Вольтамперные характеристики ФЭП «SilaSolar 200 Вт» при T^{STC}

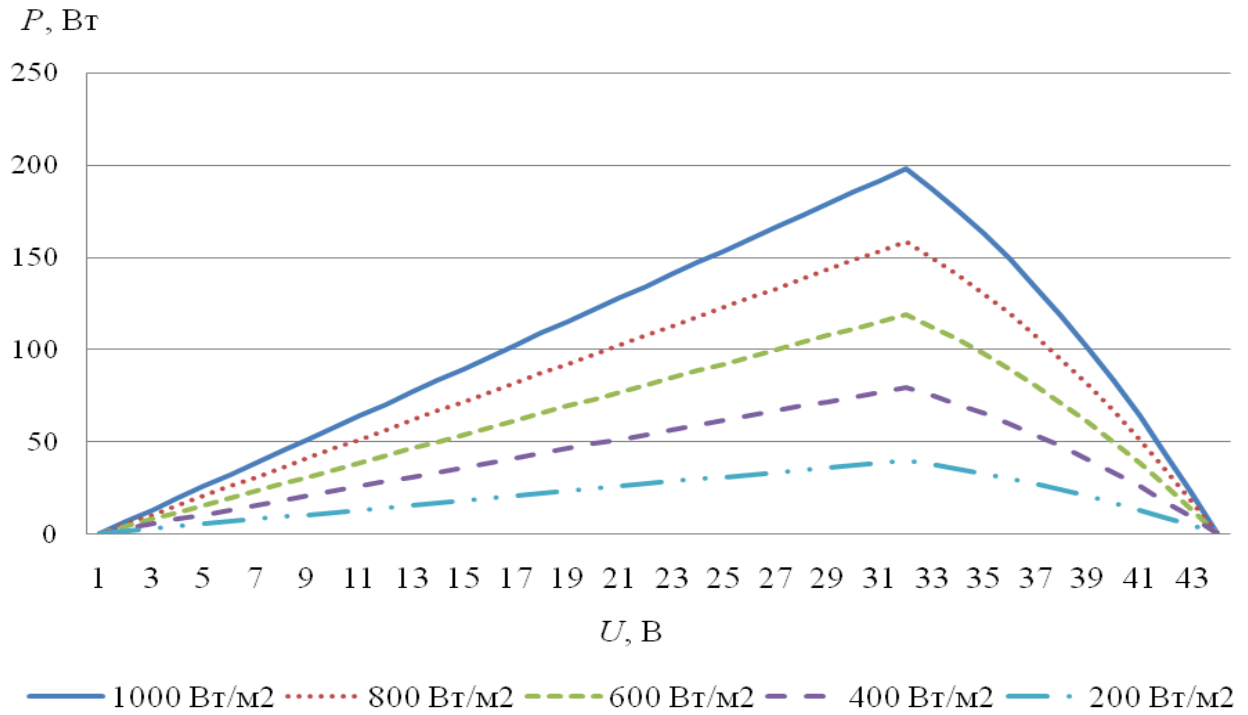


Рисунок 2.7 – Вольтваттные характеристики ФЭП
«SilaSolar 200 Вт» при STC

На рисунках 2.8 и 2.9 представлены семейства вольтамперных и вольтваттных характеристик ФЭП «SilaSolar 200 Вт для $E^{STC}=1000 \text{ Вт/м}^2$ при температурах 20, 30, 40 и 50 °С.

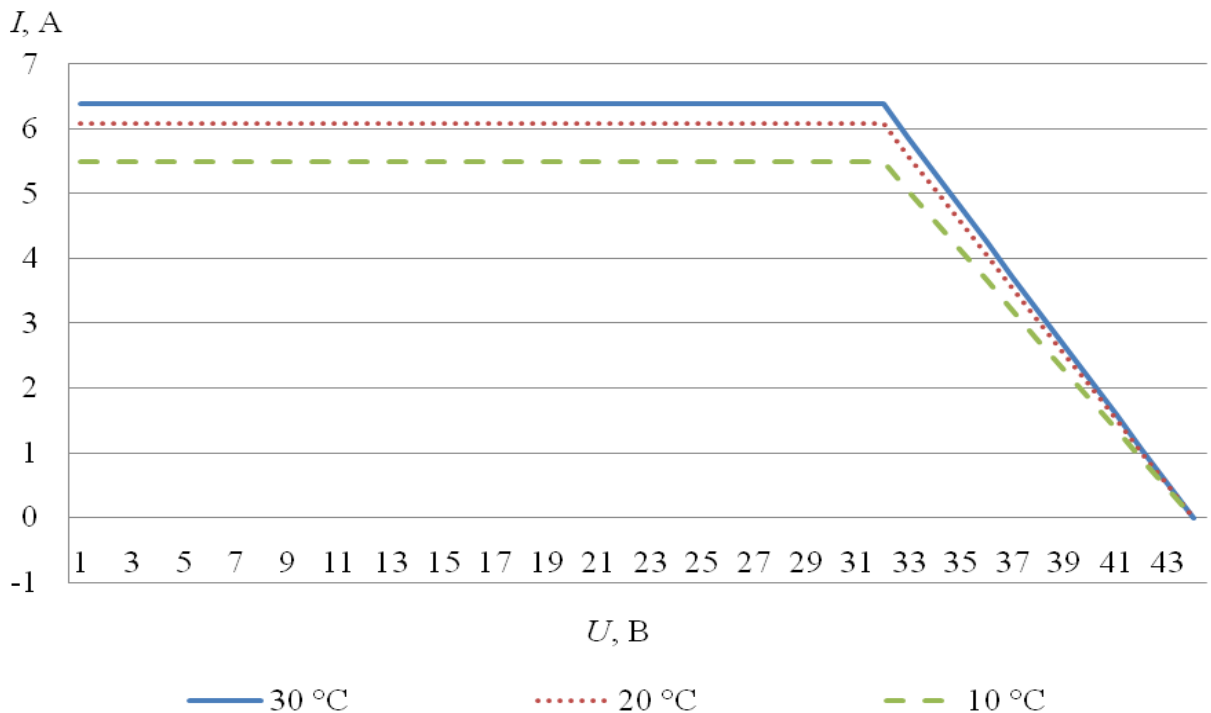


Рисунок 2.8 – Вольтамперные характеристики ФЭП «SilaSolar 200 Вт» при E^{STC}

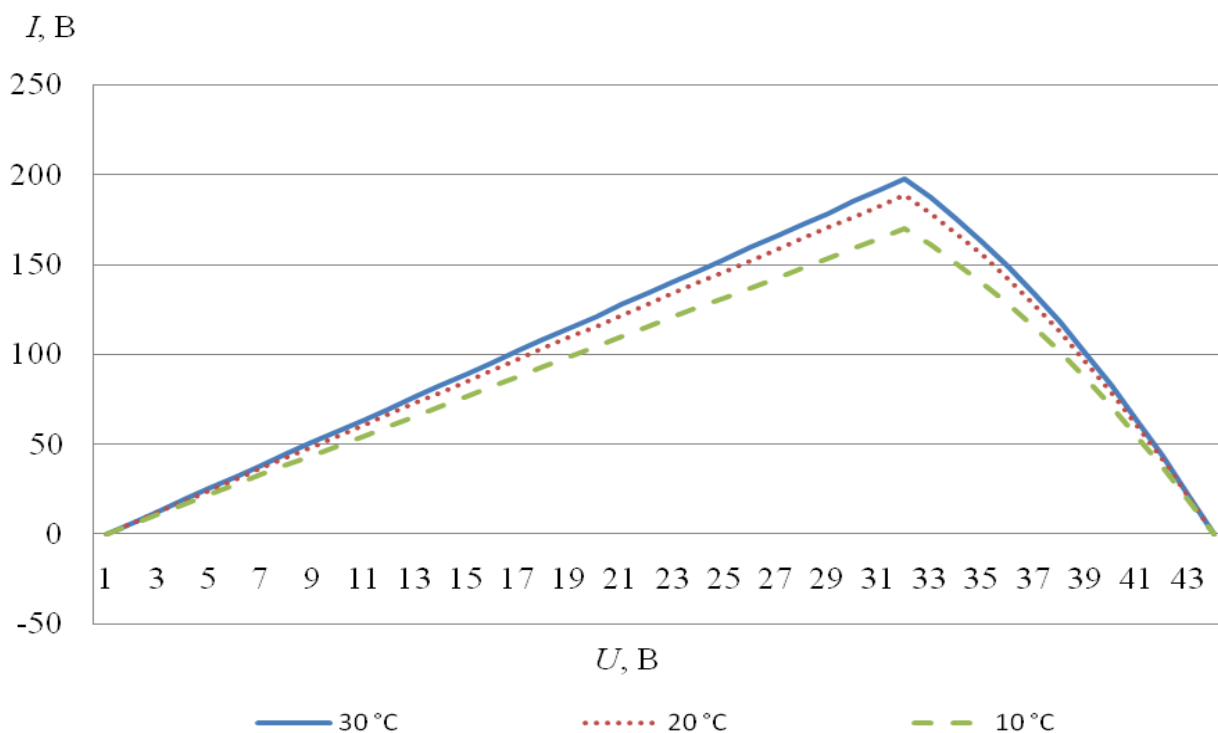


Рисунок 2.9 – Вольтваттные характеристики ФЭП «SilaSolar 200 Вт» при E^{STC}

Выходная 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.

Таким образом, сравнение полученных вольтамперных ФЭП характеристик с данными завода-изготовителя свидетельствуют о достаточно высокой точности моделирования.

2.4 Описание компьютерной имитационной программы моделирования математической модели ФЭП

Математическая модель ФЭП представлена как взаимосвязанный алгоритм вычислительных операций, позволяющий оценить влияние интенсивности СИ и

температуры окружающей среды, технических характеристик ФЭП и способа ориентации ФЭП на выходные энергетические характеристики ФЭП.

Математическая модель ФЭП реализована в программной среде имитационного моделирования Delphi 7 для визуального отображения данных и графиков [91]. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (приложение В).

Заносимые входные данные в «тело» программы разделены на 3 окна: «Данные о населённом пункте», «Технические характеристики ФЭП», «Выбор способа ориентации ФЭП».

В окно «Данные о населённом пункте» заносятся географические данные местности (широта, долгота, среднее время по Гринвичу), порядковый номер дня, данные о температуре окружающей среды с шагом 3 часа с метеостанции (рисунок 2.10).

Географическая долгота	λ	94,4534	град
Географическая широта	μ	51,711472	град
Среднее время по Гринвичу	λ_0	7	час
Порядковый номер дня года (с 1 января)	Π	196	день
Температура окружающей среды в 4 часа	T_4	19,2	°C
Температура окружающей среды в 7 часов	T_7	20,6	°C
Температура окружающей среды в 10 часов	T_{10}	27,4	°C
Температура окружающей среды в 13 часов	T_{13}	30,7	°C
Температура окружающей среды в 16 часов	T_{16}	33,8	°C
Температура окружающей среды в 19 часов	T_{19}	33	°C

Рисунок 2.10 – Диалоговое окно для ввода данных о населенном пункте

Окно «Технические характеристики ФЭП» заполняют данными максимальной мощности ФЭП, напряжения в точке максимальной мощности, тока в точке максимальной мощности, напряжения холостого хода, тока

короткого замыкания, температурных коэффициентов тока короткого замыкания и напряжения холостого хода и числа солнечных элементов (рисунок 2.11).

Параметр	Символ	Значение	Единица
Максимальная мощность	P_{MM}	200	Вт
Напряжение в точке максимальной мощности	U_{MM}^{STC}	36.61	В
Ток в точке максимальной мощности	I_{MM}^{STC}	5.47	А
Напряжение холостого хода	U_{XX}^{STC}	43,93	В
Ток короткого замыкания	$I_{KЗ}^{STC}$	5.8	А
Температурный коэффициент тока короткого замыкания	k_I	0,06	%/°C
Температурный коэффициент напряжения холостого хода	k_U	-0,34	%/°C
Число фотоэлементов	N_s	72	шт.

Рисунок 2.11 – Диалоговое окно для ввода данных технических характеристик ФЭП

В окне «Выбор способа ориентации ФЭП» (рисунок 2.12) производится выбор одного из перечисленных способов ориентации ФЭП: горизонтальный, наклонённый под углом, следящий за Солнцем или все перечисленные варианты.

Параметр	Символ	Значение	Единица
Географическая долгота	λ	94,4534	град
Географическая широта	μ	51,711472	град
Среднее время по Гринвичу	λ_0	7	час
Порядковый номер дня года (с 1 января)	n	196	день
Температура окружающей среды в 4 часа	T_4	19,2	°C
Температура окружающей среды в 7 часов	T_7	20,6	°C
Температура окружающей среды в 10 часов	T_{10}	27,4	°C
Температура окружающей среды в 13 часов	T_{13}	30,7	°C
Температура окружающей среды в 16 часов	T_{16}	33,8	°C
Температура окружающей среды в 19 часов	T_{19}	33	°C

Рисунок 2.12 – Диалоговое окно для выбора способа ориентации ФЭП

При выборе наклонной ФЭП вводится числовое значение угла наклона ФЭП.

Модель ФЭП состоит из двух подпрограмм:

«Подпрограмма расчёта интенсивности СИ» в зависимости от географических данных местности (широты, долготы, среднего времени по Гринвичу), порядкового номера дня и выбора способа ориентации ФЭП (горизонтальный, наклонённый под углом, следящий за Солнцем или все перечисленные варианты).

«Подпрограмма расчёта выходных энергетических характеристик ФЭП» по данным технических характеристик ФЭП при STC (напряжения холостого хода и тока короткого замыкания, температурных коэффициентов тока короткого замыкания и напряжения холостого хода) и климатических факторов места установки ФЭП (интенсивности СИ и способа ориентации ФЭП, температуры окружающей среды) [92].

Выводы по главе 2

1. Изучены методы получения значений интенсивности СИ на земную поверхность Республики Тыва. Предложена методика расчёта интенсивности СИ, дающая по сравнению с другими методами минимальные расхождения полученных значений с наблюдаемыми данными.

2. Усовершенствована математическая модель ФЭП, позволяющая учитывать интенсивность СИ, температуру окружающей среды, технические характеристики и способ ориентации ФЭП. Сравнение полученных с помощью модели вольтамперных характеристик ФЭП с данными завода-изготовителя свидетельствуют о достаточно высокой точности моделирования.

3. Математическая модель ФЭП реализована в программной среде имитационного моделирования Delphi 7 для выполнения расчетов и визуального отображения данных и графиков.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ВВОДУ МОЩНОСТЕЙ АВТОНОМНЫХ СОЛНЕЧНО-ДИЗЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

3.1 Методики оптимизации структуры и параметров СДУ

3.1.1 Методика расчёта выработки электроэнергии элементами при различных режимах функционирования СДУ

Методика оптимизации структуры и параметров СДУ из условия минимальной себестоимости электрической энергии должна учитывать изменения реальной величины выработки электрической энергии ФЭП и графиков нагрузки потребителя. Таким образом, в работе разработан и предложен алгоритм расчёта выработки электрогенерирующих элементов в АСЭС на основе СДУ. При этом расчет предполагается производить при ожидаемых графиках нагрузки потребителя и значениях максимально-возможной выработки электрической энергии ФЭП с шагом один час [6, 92].

Для этого АСЭС вводится обозначение функции выработки электрической энергии:

$$W_i^{\text{ФЭП}} - W_i^{\text{П}} = 0, \quad (3.1)$$

где $W_i^{\text{ФЭП}}$, кВт·ч – выработка электрической энергии, производимой от ФЭП; $W_i^{\text{П}}$, кВт·ч – требуемое потребление электрической энергии; i – рассматриваемый час.

Пусть в начальный момент времени АБ имеет максимальный уровень заряда.

$$W_n^{AB} = W_{\max}^{AB}, \quad (3.2)$$

где W_n^{AB} , кВт·ч – уровень энергии заряда АБ в начале i -ого часа; W_{\max}^{AB} , кВт·ч – максимальный уровень энергии заряда АБ.

Расчет выработки электрогенерирующих элементов в АСЭС на основе СДУ производится при следующих возможных режимах:

Если энергии, вырабатываемой от ФЭП больше, чем требуется для покрытия нагрузки $W_i^{\text{ФЭП}} > W_i^{\text{П}}$, ее излишки уходят на заряд АБ [32].

$$\begin{aligned} W_i^{\text{ФЭП}} + W_{\text{зар}}^{AB} - W_i^{\text{П}} &= 0, \\ W_{\text{зар}}^{AB} &\rightarrow W_{\max}^{AB}, \end{aligned} \quad (3.3)$$

где $W_{\text{зар}}^{AB}$, кВт·ч – уровень энергии заряда АБ; W_{\max}^{AB} , кВт·ч – максимальный уровень энергии заряда АБ.

При достижении максимального уровня энергии АБ, излишек выработки электрической энергии от ФЭП сбрасывается на трубчатый электронагреватель (ТЭН) воды.

$$\begin{aligned} W_i^{\text{ФЭП}} + W_{\text{зар}}^{AB} - W_i^{\text{П}} - W_i^{\text{ТЭН}} &= 0, \\ W_{\text{зар}}^{AB} &= W_{\max}^{AB}, \end{aligned} \quad (3.4)$$

где $W_i^{\text{ТЭН}}$, кВт·ч – излишек энергии, сбрасываемый на ТЭН.

Если энергии от ФЭП недостаточно для покрытия нагрузки $W_i^{\text{ФЭП}} < W_i^{\text{П}}$, дефицит покрывается за счет АБ [32]:

$$\begin{aligned} W_i^{\text{ФЭП}} + W_{\text{раз}}^{AB} - W_i^{\text{П}} &= 0, \\ W_{\text{раз}}^{AB} &\rightarrow W_{\min}^{AB}, \end{aligned} \quad (3.5)$$

где W_{\min}^{AB} , кВт·ч – минимальный уровень энергии заряда АБ.

При достижении минимального уровня энергии АБ, для питания нагрузки подключаются ДГ:

$$W_i^{\PhiЭП} + W_i^{ДГ} - W_{раз}^{AB} - W_i^{\Pi} = 0, \quad (3.6)$$

$$W_{раз}^{AB} = W_{\min}^{AB},$$

где $W_i^{ДГ}$, кВт·ч – выработка электрической энергии от ДГ.

Уровень емкости АБ в конце i -ого часа W_{κ}^{AB} , кА·ч:

$$W_{\kappa}^{AB} = W_n^{AB} \pm W_i^{AB} \cdot \Delta t, \quad (3.7)$$

Расход дизельного топлива зависит от выходной мощности $B_{ДГ}$, л/ч [93]:

$$B_i^{ДГ} = A \cdot P_{вых}^{ДГ} + B \cdot P_{уст}^{ДГ}, \quad (3.8)$$

где $P_{вых}^{ДГ}$, кВт – выходная мощность ДГ; $P_{уст}^{ДГ}$, кВт – номинальная мощность ДГ;

$A = 0,246$, л/кВт·ч и $B = 0,0845$, л/кВт·ч – коэффициенты кривой потребления.

Годовой расход дизельного топлива:

$$B_{год}^{ДГ} = \sum_{i=1}^{365} B_i^{ДГ}, \quad (3.9)$$

Годовая выработка электрической энергии АСЭС на основе СДУ:

$$W_{год}^{СДУ} = \sum_{i=1}^{365} W_i^{\PhiЭП} + \sum_{i=1}^{365} W_i^{ДГ}. \quad (3.10)$$

Алгоритм расчёта выработки электрической энергии элементами при различных режимах функционирования АСЭС СДУ представлен на рисунке 3.1.

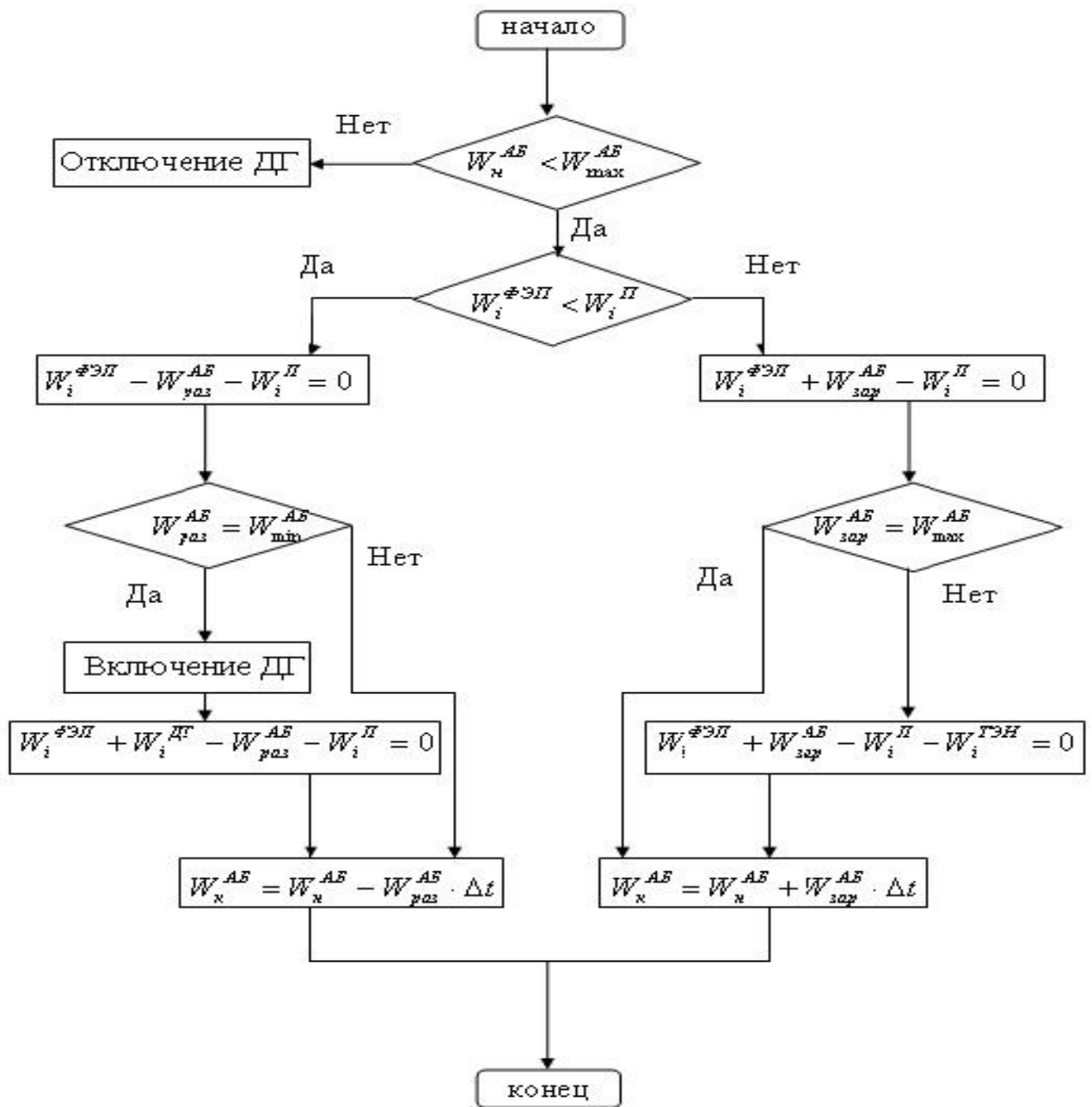


Рисунок 3.1 – Алгоритм расчета выработки электрической энергии элементами при различных режимах функционирования СДУ

Расчет годовых показателей выработки электрической энергии элементами СДУ дает возможность рассчитать экономическую эффективность проекта.

В качестве целевой функции СДУ в работах [47, 53–55, 94–104] используется минимум приведенных затрат, складывающийся из совокупности затрат и издержек на строительство и эксплуатацию СДУ. Для определения инвестиционной привлекательности проекта авторы работ [97] применяют срок окупаемости проекта. Минимум себестоимости электрической энергии используется в работе [98] как наиболее распространённый критерий экономической эффективности. В качестве критерия эффективности в [55, 105] используются методы динамического подхода, основанные на принципе дисконтирования на основе оценки ценности денежных средств во времени (чистый дисконтированный доход, чистая приведенная стоимость).

В данной диссертационной работе в качестве целевой функции СДУ принят критерий минимума себестоимости электрической энергии, учитывающий выработку электрической энергии элементами при различных режимах функционирования СДУ, руб./кВт·ч [106]:

$$C_{СДУ} = \frac{(\sum_{i=1}^{200} W_i^П - \sum_{i=1}^{200} W_i^{ДГ}) \cdot C^{\PhiЭП} + \sum_{i=1}^{200} W_i^{ДГ} \cdot C^{ДЭС}}{\sum_{i=1}^{200} W_i^П}, \quad (3.11)$$

где $C^{ДЭС}$, руб./кВт·ч – себестоимость электрической энергии от ДЭС;
 $C^{\PhiЭП}$, руб./кВт·ч – себестоимость электрической энергии, производимой от ФЭП:

$$C^{\PhiЭП} = \frac{З}{(\sum_{i=1}^{200} W_i^П - \sum_{i=1}^{200} W_i^{ДГ}) \cdot T_{ок}}, \quad (3.12)$$

где $T_{ок}$, лет – срок окупаемости проекта; $З$, тыс. руб. – приведённые затраты СДУ:

$$Z = E_n \cdot K + I, \quad (3.13)$$

где E_n – норма дисконтирования; K , тыс. руб. – капитальные затраты СДУ; I , тыс. руб. – издержки на обслуживание и эксплуатацию СДУ.

Капитальные затраты на СДУ складываются из затрат на покупку оборудования ФЭП, АБ, ДГ и инвертора, дополнительного оборудования, на доставку, страховку при перевозке ФЭП, АБ и ДГ, проектные работы, строительные-монтажные работы. При выборе способа ориентации ФЭП стоимость системы слежения за Солнцем отражается в капитальных затратах.

При расчёте издержек на обслуживание и эксплуатацию СДУ учитывается количество замен АБ n_{AB} :

$$n_{AB} = \frac{T_{OK}}{T^{AB}}, \quad (3.14)$$

где T^{AB} , лет – срок службы АБ:

$$T^{AB} = \frac{n_{AB} \cdot W^{1AB}}{\sum_{i=1}^{zod} W_i^{1AB}}, \quad (3.15)$$

где n_{AB} , шт. – общее число АБ; кВт·ч/год – годовая энергия, поступающая на заряд одиночной АБ; W^{1AB} , кВт·ч – энергоёмкость одной АБ:

$$W^{1AB} = C^{1AB} \cdot U^{1AB}, \quad (3.16)$$

где C^{1AB} , кА·ч – номинальная ёмкость одной АБ, U^{1AB} , В – номинальное напряжение одной АБ.

3.1.2 Метод роя частиц при оптимизации структуры и параметров СДУ

В задаче оптимизации требуется выбрать структуру и параметры СДУ, в которой независимыми оптимизируемыми переменными являются общие установленные мощности ФЭП и ДГ (или число заданного типоразмера) и общая установленная емкость АБ (или число заданного типоразмера) [106–107].

При этом на оптимизируемые переменные накладывается ряд ограничений по предельным допустимым уровням установленной мощности:

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

2. АБ должны обеспечить прием максимальной мощности от всех ФЭП, за вычетом мощности, которая идет потребителю [97].

3. Общая установленная мощность ДГ должна обеспечить электрическую энергию в период максимального потребления (зимой). Количество установленных ДГ должно быть избыточным для обеспечения возможности вывода из работы агрегатов для сервисного обслуживания, текущего и капитального ремонтов. При этом для удобства обслуживания следует выбирать ДГ одинакового типоразмера.

Процедура использования метода роя частиц для решения задачи оптимизации СДУ включает следующие шаги обновления [54, 61–62]:

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

$$x_{id}^{(k+1)} = x_{id}^k + u_{id}^{(k+1)}, \quad (3.17)$$

2. Скорость переменных на итерации обновляется с помощью выражения:

$$u_{id}^{(k+1)} = \omega u_{id}^{(k)} + \varphi_1 \cdot \alpha_1^{(k)} \cdot (pb_{id}^{(k)} - x_{id}^{(k)}) + \varphi_2 \cdot \alpha_2^{(k)} \cdot (gb_{id}^{(k)} - x_{id}^{(k)}), \quad (3.18)$$

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 3.2.

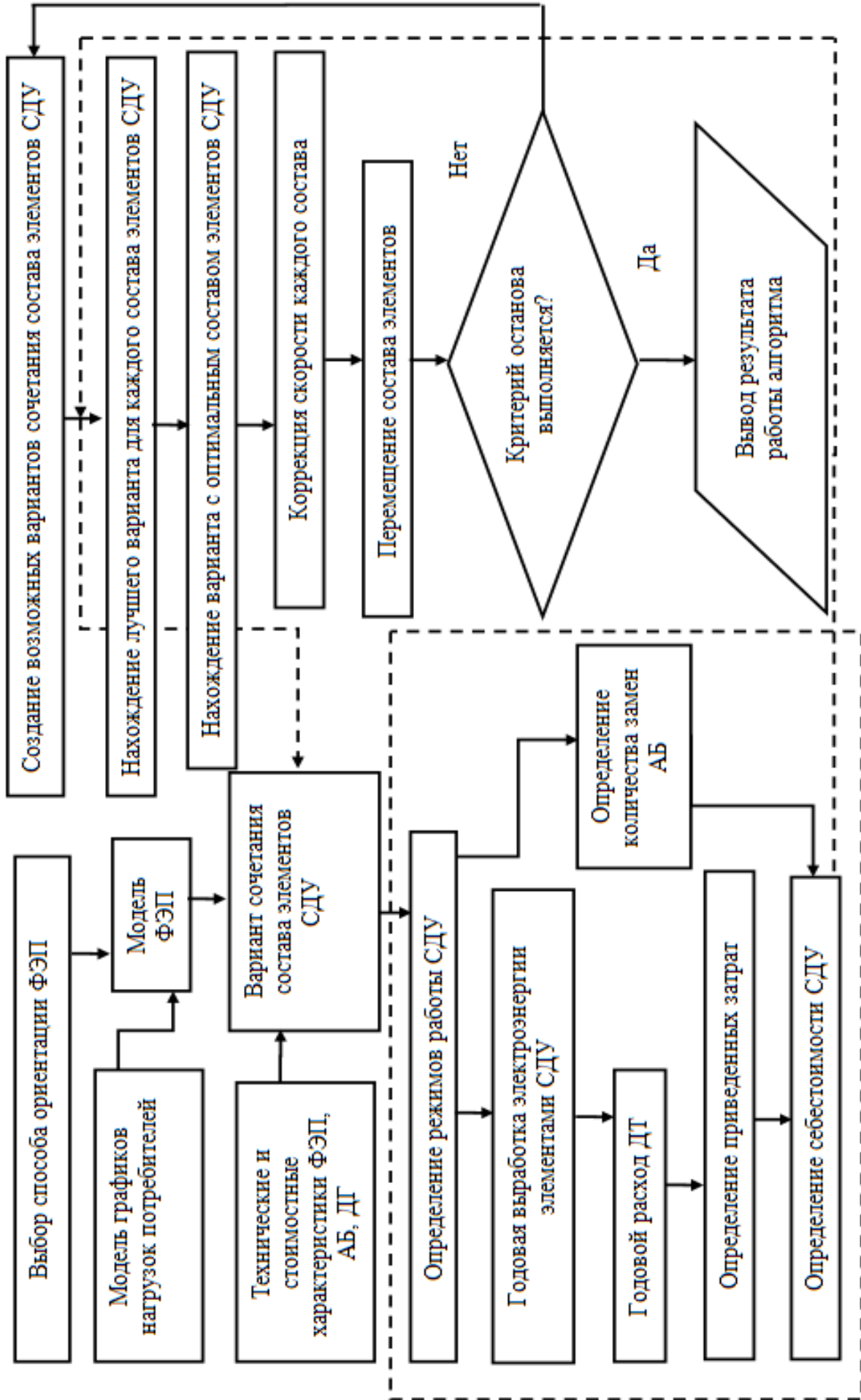


Рисунок 3.2 – Структурная схема методики оптимизации СДУ

3.1.3 Описание программы для ЭВМ при оптимизации структуры и параметров СДУ

Для обеспечения удобства работы и оперативности проведения оптимизационных исследований разработанная методика в пп 3.1.2 была реализована в программной среде MATLAB [108]. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ (приложение Г).

Исходными данными при оптимизации структуры и параметров СДУ с использованием программы для ЭВМ являются:

- база данных ФЭП, АБ, ДГ с различными типоразмерами и стоимостью (приложение Д).
- графики выходных энергетических характеристик ФЭП для поселка, выгруженные из ПВК и описанные в пункте 2.4.
- графики нагрузки с шагом 1 час.

В ПВК заложены алгоритм расчета выработки электрической энергии АСЭС на основе СДУ при различных режимах, последовательность расчета годовой выработки электрической энергии элементами СДУ и технико-экономических показателей.

В ПВК необходимо ввести данные о максимальной нагрузке потребителя, себестоимости электрической энергии от ДЭС и заданный срок окупаемости проекта (рисунок 3.3).

Входные данные

Максимальная нагрузка потребителя, кВт

Срок окупаемости проекта, годы

Себестоимость э/э от ДЭС, руб./кВт час

Графики нагрузки потребителя

Графики выработки ФЭП

Рассчитать

Рисунок 3.3 – Окно ввода данных о нагрузке ДЭС

В окне ввода представлены технические и стоимостные характеристики (мощность (ёмкость для АБ), стоимость и срок эксплуатации) ФЭП, АБ и ДГ, в котором заложены монокристаллические и поликристаллические ФЭП, АБ типов Gel, AGM и LiFePO4, ДГ отечественного производства «Азимут» (рисунок 3.4).

Генераторы

	Модель	Активная мощность, кВт	Стоимость, тыс.руб.
1	АД8-Т400	8	231.4130
2	АД10-Т400	10	231.6860
3	АД12-Т400	12	247.8800
4	АД16-Т400	16	247.8840
5	АД20-Т400	20	250.7050
6	АД24-Т400	24	265.1170

Сохранить
Добавить

Аккумуляторные батареи

	Модель	Ёмкость, кА*ч	Напряжение, В	Гарантийный срок, лет	С
1	MLQ12-100	0.1000	12	12	12
2	AKBSW1...	0.1000	12	12	12
3	Delta DT...	0.1000	12	10	10
4	GX12-100	0.1000	12	12	12
5	MLQ12-150	0.1500	12	12	12

Сохранить
Добавить

Солнечные панели

	Модель	Мощность, кВт	Гарантийный срок, лет	Стоимость, тыс
1	PSIP100 ...	0.1000	25	4.1
2	PSIP150-...	0.1500	25	5.4
3	PSIP200-...	0.2000	25	7.1
4	PSIP250-...	0.2500	25	8.1
5	PSIP300	0.3000	25	10.1

Сохранить
Добавить

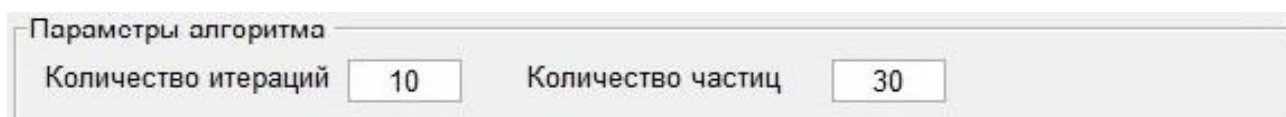
Тип опоры солнечных панелей

Статическая С системой трекинга Горизонтальная

Рисунок 3.4 – Окно ввода технических и стоимостных характеристик оборудования элементов СДУ

При этом можно добавить в ПВК технические и стоимостные характеристики ФЭП, АБ и ДГ.

Оптимизация состава (количество и модель) элементов СДУ осуществляется методом «роя частиц», целевой функцией которого является минимизация себестоимости электрической энергии СДУ. Поэтому для реализации метода требуется задать параметры алгоритма «роя частиц» (рисунок 3.5).



Параметры алгоритма	
Количество итераций	10
Количество частиц	30

Рисунок 3.5 – Окно ввода параметров алгоритма оптимизации

Диапазоны мощности (емкости) ФЭП, АБ и ДГ ограничиваются в соответствии с описанными выше допущениями. При этом состав (количество и модель) элементов СДУ в процессе оптимизации ранжируется в порядке возрастания мощности и стоимости.

Кроме этого, ПВК производит расчет капитальных затрат и себестоимости электрической энергии оптимального варианта АСЭС на основе СДУ за заданный срок окупаемости проекта.

3.2 Интеллектуальная поддержка принятия решений при выборе площадки размещения элементов СДУ

С точки зрения снижения общих затрат на строительство СДУ и повышения эффективности использования ресурсов солнечной энергии 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 [109–118].

Для решения задачи принятия решений при выборе площадки размещения элементов СДУ выбран многокритериальный подход, основанный на экспертной оценке [119–120]. Процедура многокритериальной оценки эффективности вариантов площадки СДУ на основе экспертных оценок состоит из нескольких этапов.

Выбор ЛПР. Число ЛПР должно быть не менее числа критериальных свойств (КС), учитываемых при сравнении вариантов площадок. Состав ЛПР определяется необходимостью присутствия специалистов, компетентных в области солнечной энергетики. Ориентировочное число ЛПР может быть от 5 до 10.

Формулировка и выбор КС. Экспертный состав устанавливает перечень КС, подлежащей оценке. По мнению экспертного состава КС, представленные в сравниваемых вариантах площадок в одинаковой степени из перечня исключаются [121–122]. Формулировка каждого КС должна быть принята каждым ЛПР, т.е. должно быть однозначное понимание каждого КС всеми ЛПР без исключения. Количество КС и их выбор зависят от уровня знаний экспертного состава. Объединяя КС по смыслу, можно добиться некоторого ограничения их числа. При этом в перечне может быть от 3 до 7 КС.

Определение весомостей КС. Перед началом работы ЛПР предоставляют всю необходимую информацию о качественных и количественных требованиях, условиях эксплуатации и аналогичных решениях для других типовых объектов. При оценке весомостей КС используются метод непосредственной оценки, метод ранговой корреляции, метод последовательных сопоставлений, метод модификации частичного и парного сравнения и т. д. [123–124]. Однако практический опыт применения методов показал, что на ранних стадиях проектирования энергообъектов наиболее часто используется метод ранговой корреляции [125].

Согласно работам, представленным в [123–124], каждое ЛПР присваивает оценочный ранг a_i каждому КС, соответствующий месту, занимаемому КС в порядке убывания его весомости (важности). При этом первое место или ранг $a = 1$ получает наиболее важное КС. Если невозможно различить несколько КС по их важности, то им присваивается ранг, отвечающий среднему из суммы соответствующих мест.

Весомость v_{ij} – го КС определяется:

$$v_i = w_i \left(\sum_{i=1}^n w_i \right)^{-1}, \quad (3.19)$$

$$w_i = 1 - A_i(nN)^{-1} + n^{-1}, \quad (3.20)$$

где N – число ЛПР; n – число КС в перечне; A_i – сумма рангов i -го КС:

$$A_i = \sum_{k=1}^n a_{ik}, \quad (3.21)$$

где a_{ik} – ранг.

Степень согласованности мнений ЛПР с ранжированием всей совокупности КС характеризуется коэффициентом конкордации C [115].

При отсутствии связанных рангов:

$$C = \frac{12\Delta A_{\Sigma}}{N^2(n^3 - n)};$$

$$\Delta A_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n (\Delta A_i)^2; \quad (3.22)$$

$$\Delta A_i = A_i - A_{cp};$$

$$\Delta A_{\text{ср}} = \frac{1}{n \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^N a_{ik}}.$$

При наличии связанных рангов

$$C = \frac{\Delta A_{\Sigma}}{\frac{1}{12} N^2 (n^3 - n) - N \sum_{k=1}^N T_k}; \quad (3.23)$$

где $T_k = \frac{1}{12} \sum_{k=1}^m (t_k^3 - t_k)$ – показатель связанных рангов у k -го ЛПР;

m – число связанных рангов; t_k – число повторений каждого ранга в k -м ряду; $m < n$.

Далее вычисляется квантиль распределения χ_C^2 для оценки значимости коэффициента конкордации.

При отсутствии связанных рангов квантиль равен:

$$\chi_C^2 = \frac{A_{\Sigma}}{\frac{1}{12} Nn(n+1)}; \quad (3.24)$$

При наличии связанных рангов квантиль равен:

$$\chi_C^2 = \frac{\Delta A_{\Sigma}}{\frac{1}{12} Nn(n+1) - \frac{1}{(n-1)} N \sum_{k=1}^n T_k}. \quad (3.25)$$

Связи между ранжированием объектов у различных ЛПР не существует при $C = 0$, соответственно, все ЛПР одинаково ранжируют объект при $C = 1$ [124–125].

Затем при числе степеней свободы r и уровне значимости α (обычно $\alpha = 0,05$); $r = n - 1$ определяется квантиль распределения. Коэффициент согласия считается значимым и мнения ЛПР не расходятся при $\chi_C^2 \leq \chi_{\text{табл}}^2$.

Относительные оценки эффективности КС e_{ij} при отсутствии численных показателей y_i получают ранжированием вариантов площадки каждым ЛПР.

Сумма рангов B_{ij} :

$$B_{ij} = \sum_{k=1}^N b_{ijk}, \quad (3.26)$$

Эффективность e_{ij} КС– для каждого варианта:

$$e_{ij} = 1 - B_{ij}(mN)^{-1} + m^{-1}, \quad (3.27)$$

где m – число вариантов.

Оценка эффективностей вариантов по КС основывается на определении показателей КС, связанных с этими КС [123]. При оценке эффективности по каждому из КС также требуется участие ЛПР для выбора соответствующих показателей, способов оценок тех КС, которым не удастся подобрать численный показатель. При назначении оценок можно использовать возможные экономические и технические расчеты, а также индивидуальный или коллективный опыт ЛПР в тех случаях, когда по какому-либо КС не удастся подобрать численный показатель. С помощью линейного преобразования может быть осуществлен переход численных показателей КС в относительные оценки y_i в диапазоне $[0; 1]$:

$$\begin{aligned} & 0 \text{ при } y_i \leq y_i^H; \\ e_i &= \frac{y_i - y_i^H}{y_i^B} \text{ при } y_i^H \leq y_i \leq y_i^B; \\ & 1 \text{ при } y_i \geq y_i^B \\ & \text{или} \\ & 1 \text{ при } y_i \leq y_i^H; \\ e_i &= \frac{y_i^B - y_i}{y_i^B - y_i^H} \text{ при } y_i^H \leq y_i \leq y_i^B; \\ & 0 \text{ при } y_i \geq y_i^B. \end{aligned} \quad (3.28)$$

Верхними и нижними границами задается диапазон возможных значений показателей в одном из четырех видов $[0, y_i^B]$, $[y_i^H, y_i^B]$, $[y_i^H, \infty]$, $[0, \infty]$ и вводится функциональное преобразование, приводящее отрезок $[y_i^H, y_i^B]$ к $[0;1]$.

Как и при любом обычном рассмотрении вопроса о показателях диапазон изменений КС устанавливаются на экспертной основе.

Комплексная оценка эффективности вариантов решений заключается в свертке всех КС в единый (комплексный критерий эффективности). В настоящее время в квалиметрии разработано несколько десятков форм свертки [124]:

Средняя арифметическая линейная форма используется при любых способах оценок, лишь бы они были в интервале $[0;1]$, а весомости КС не зависели от оценок частной эффективности (оценок степени достижения частных целей) для любых сравниваемых вариантов или объектов:

$$F_k^* = \sum_{i=1}^n v_i e_{ik} \text{ при } \sum_{i=1}^n v_i = 1, \quad (3.29)$$

Мультипликативная средняя геометрическая форма дополнена коэффициентом вето:

$$F_k^* = \prod_{i=1}^n (e_i)^{v_i} \text{ при } \sum_{i=1}^n v_i = 1 \quad (3.30)$$

Средняя гармоническая форма свертки:

$$F_k^* = \left(\sum_{i=1}^n \frac{v_i}{e_{ik}} \right)^{-1} \text{ при } \sum_{i=1}^n v_i = 1. \quad (3.31)$$

Значение целевой функции F_k^* для каждого варианта размещения площадки СДУ является комплексной оценкой его качества и дает возможность упорядочить варианты по их эффективности. Диапазон возможных значений целевой функции удобно выбирать единичным отрезком. Тогда любому неэффективному варианту площадки соответствует значение $F_k^* = 0$, а

идеальному – $F_k^* = 1$. Требуемое нормирование диапазона F_k^* должно обеспечиваться структурой целевой функции и соответствующим масштабированием весовых коэффициентов.

В качестве оптимального варианта площадки для размещения элементов СДУ выбирается тот, у которого достигается наибольшая оценка эффективности по выражениям (3.29–3.31).

Ошибки в оценке частных эффективностей y_i определяются погрешностями измерения показателей y_i и распределениями вероятностей этих погрешностей. При определении e_i экспертным путем ошибки оценок вычисляются аналогично ошибкам v_i . При экспертной оценке v_i и e_i их средняя квадратичная ошибка снижается пропорционально корню квадратному из числа ЛПР [124]. Если считать значения v_i и e_i случайными величинами с известными средними квадратичными отклонениями σ_e и σ_v , то средняя квадратичная ошибка целевой функции будет максимальна при отсутствии корреляции между v_i и e_i .

$$\sigma_{E^*} = \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\partial \bar{E}^*}{\partial e_i} \right)^2 \sigma_{e_i}^2 + \left(\frac{\partial \bar{E}^*}{\partial v_i} \right)^2 \sigma_{v_i}^2 \right] \right\}^{1/2}, \quad (3.32)$$

где черта над частной производной $\partial \bar{E}^* / \partial e_i$ означает, что производная вычисляется в точке математического ожидания e_i ; $\partial \bar{E}^* / \partial v_i$ – соответственно в точке математического ожидания v_i .

Из формулы (3.32) для средней арифметической формы целевой функции (3.29) получим:

$$\sigma_{E^*}^{\text{ap}} = \left\{ \sum_{i=1}^n [v_i^{-2} \sigma_{e_i}^2 + e_i^{-2} \sigma_{v_i}^2] \right\}^{1/2}; \quad (3.33)$$

для средней геометрической формы:

$$\sigma_{E^*}^{\text{геом}} = E_{\text{геом}}^* \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\bar{v}_i}{\bar{e}_i} \right)^2 \sigma_{e_i}^2 + (\ln \bar{e}_i)^2 \sigma_{v_i}^2 \right] \right\}^{1/2}; \quad (3.34)$$

для средней гармонической формы:

$$\sigma_{E^*}^{\text{гарм}} = (E_{\text{геом}}^*)^2 \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{\bar{v}_i}{e_i^2} \right)^2 \sigma_{e_i}^2 + \frac{\sigma_{v_i}^2}{\bar{e}_i^2} \right] \right\}^{1/2}. \quad (3.35)$$

Применение формул (3.33), (3.34) и (3.35) на практике показало, что ошибки σ_{E^*} средней гармонической формы целевой функции значительно меньше, чем у мультипликативной и тем более арифметической форм, при тех же самых ошибках в оценках v_i и e_i . Следовательно, средняя гармоническая форма (3.35) обладает большей разрешающей способностью при сравнении близких по своим свойствам объектов с невысокой точностью оценок v_i и e_i . Кроме того, средняя гармоническая форма весьма резко занижает оценки целевой функции у вариантов, имеющих низкие показатели по отдельным свойствам [124–125].

Таким образом, форму (3.33) можно рекомендовать в качестве показателя эффективности за простоту вычислений и наглядность. Форма (3.34) также проста для вычислений, совместное применение (3.33) и (3.34) позволяет уверенно различать большое число вариантов, включая и те, у которых КС получили одинаковые оценки e_{ik} .

Выводы по главе 3

1. Предложена методика оптимизации структуры и параметров СДУ из условия минимальной себестоимости вырабатываемой электрической энергии, отличающаяся возможностью учитывать изменения реальной величины выработки электрической энергии ФЭП и графиков нагрузки потребителя, на основе которой осуществляется поиск оптимального соотношения генерирующих мощностей, выбора оптимального единичного типоразмера оборудования.

2. Методика оптимизации для обеспечения удобства работы и оперативности проведения оптимизационных исследований реализована в программной среде MATLAB.

3. Разработана методика принятия решений при выборе площадки для размещения элементов СДУ с использованием теории многокритерийной оптимизации и метода экспертных оценок с использованием, которая позволяет учитывать комплекс технико-экономических, климатических и экологических критериев.

ГЛАВА 4. ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ ПО ВВОДУ МОЩНОСТЕЙ СОЛНЕЧНО-ДИЗЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ПОСЕЛКОВ РЕСПУБЛИКИ ТЫВА

4.1 Оценка интенсивности СИ и районирование Республики Тыва по солнечным зонам

С помощью методики оценки интенсивности СИ на горизонтальную поверхность, описанной в пункте 2.2, определены среднегодовые значения интенсивности СИ на горизонтальную поверхность для изолированных районов Республики Тыва (рисунок 4.1).

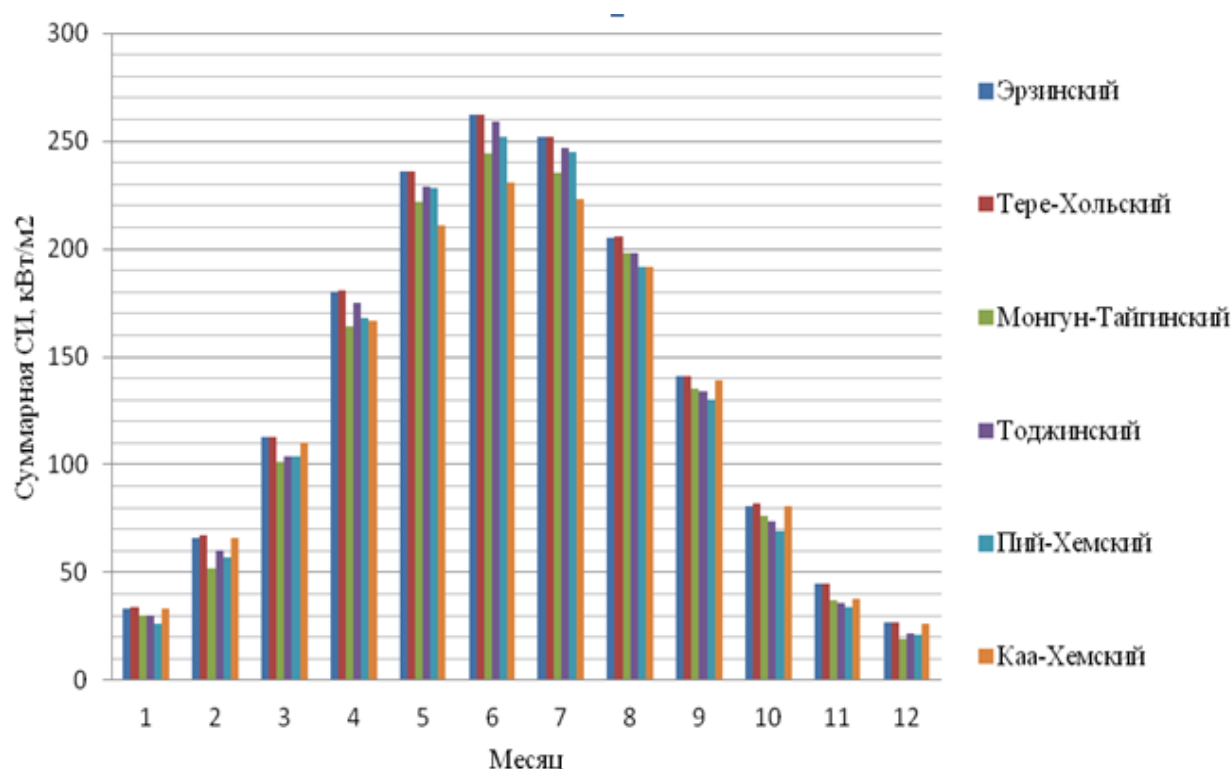


Рисунок 4.1 – Среднегодовые значения интенсивности СИ на горизонтальную поверхность для изолированных районов Тывы

По результатам расчета с учетом физико-географических особенностей рельефа местности произведено районирование территории Республики Тыва по солнечным зонам (рисунок 4.2) [6].

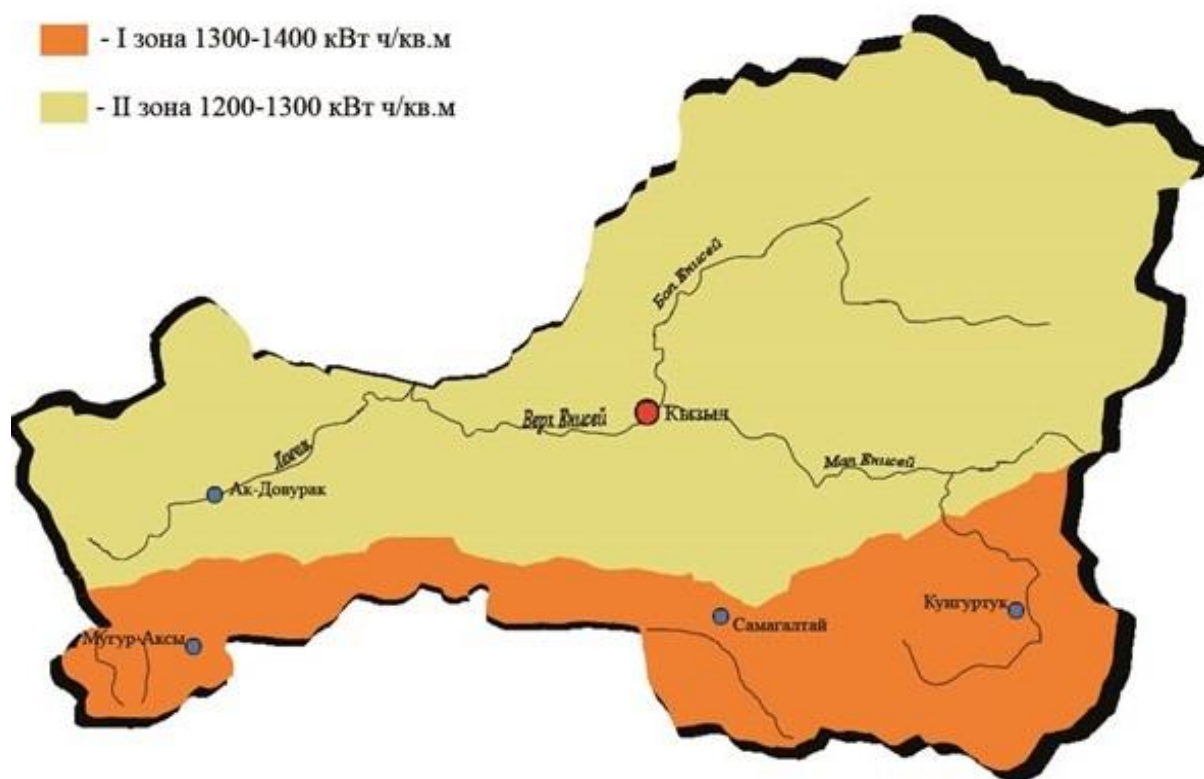


Рисунок 4.2 – Районирование территории Республики Тыва по солнечным зонам

По полученным значениям интенсивности СИ на горизонтальную поверхность Республика Тыва характеризуется двумя солнечными зонами:

– I солнечная зона со значениями интенсивности СИ на горизонтальную поверхность, равными 1300...1400 кВт·ч/м² за год. Она расположена в основном в южной части республики и характеризуется отсутствием леса, сочетанием тундр и лугов. В зону входят Эрзинский, Монгун-Тайгинский, Тере-Хольский районы.

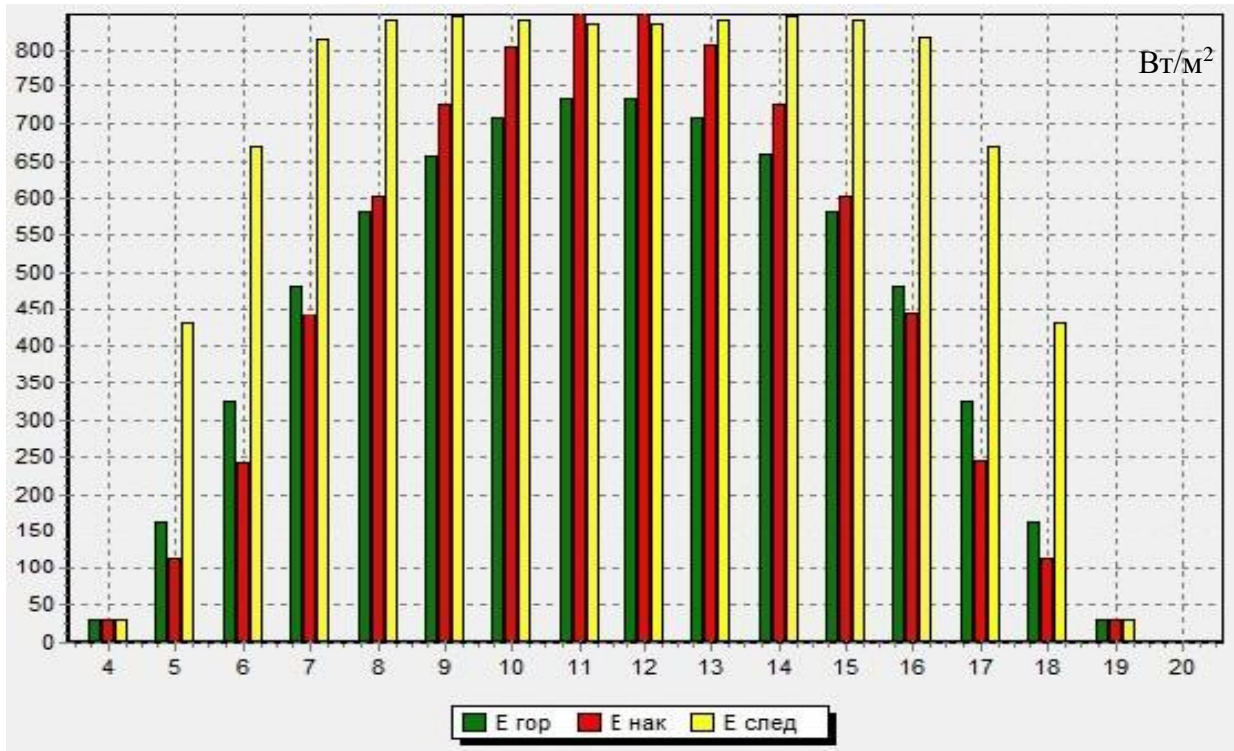
– II солнечная зона достаточно благоприятная для использования солнечной энергетики, интенсивность СИ на горизонтальную поверхность, составляет 1200...1300 кВт·ч/м² за год, расположена в центральной и северной части республики. В этой зоне относятся Каа-Хемский, Пий-Хемский, Тоджинский районы [85].

По результатам районирования Республики Тыва по солнечным зонам следует отметить, что для первоочередного размещения СДУ необходимо выбрать изолированные поселки, расположенные в I солнечной зоне.

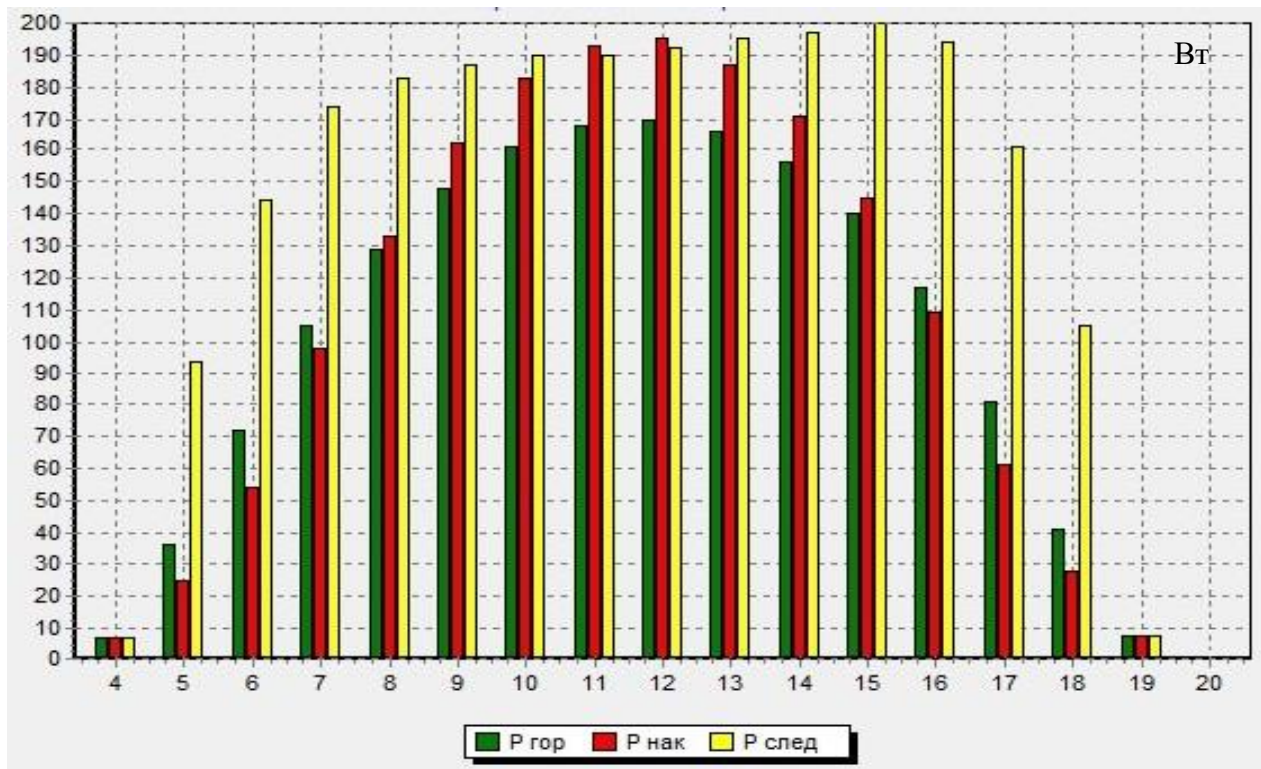
4.2 Расчеты прогнозируемых выходных энергетических характеристик ФЭП в АСЭС

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 в пункте 2.3 методике прогнозируемые значения изменений интенсивности СИ и мощности ФЭП «SilaSolar 200 Вт» для 15-ого июля и 15 января при различных способах ориентации ФЭП (рисунки 4.3-4.4).

Суммарное прогнозируемое значение интенсивности СИ в п. Качык для 15-ого января для горизонтально расположенной ФЭП составило 1,142 кВт/м², для наклонной ФЭП составило 2,391 кВт/м², для следящей ФЭП – 2,771 кВт/м². Суммарное прогнозируемое значение интенсивности СИ в п. Качык для 15-ого июля для горизонтально расположенной ФЭП составило 7,363 кВт/м², для наклонной ФЭП составило 7,631 кВт/м², для следящей ФЭП – 10,625 кВт/м².



а)

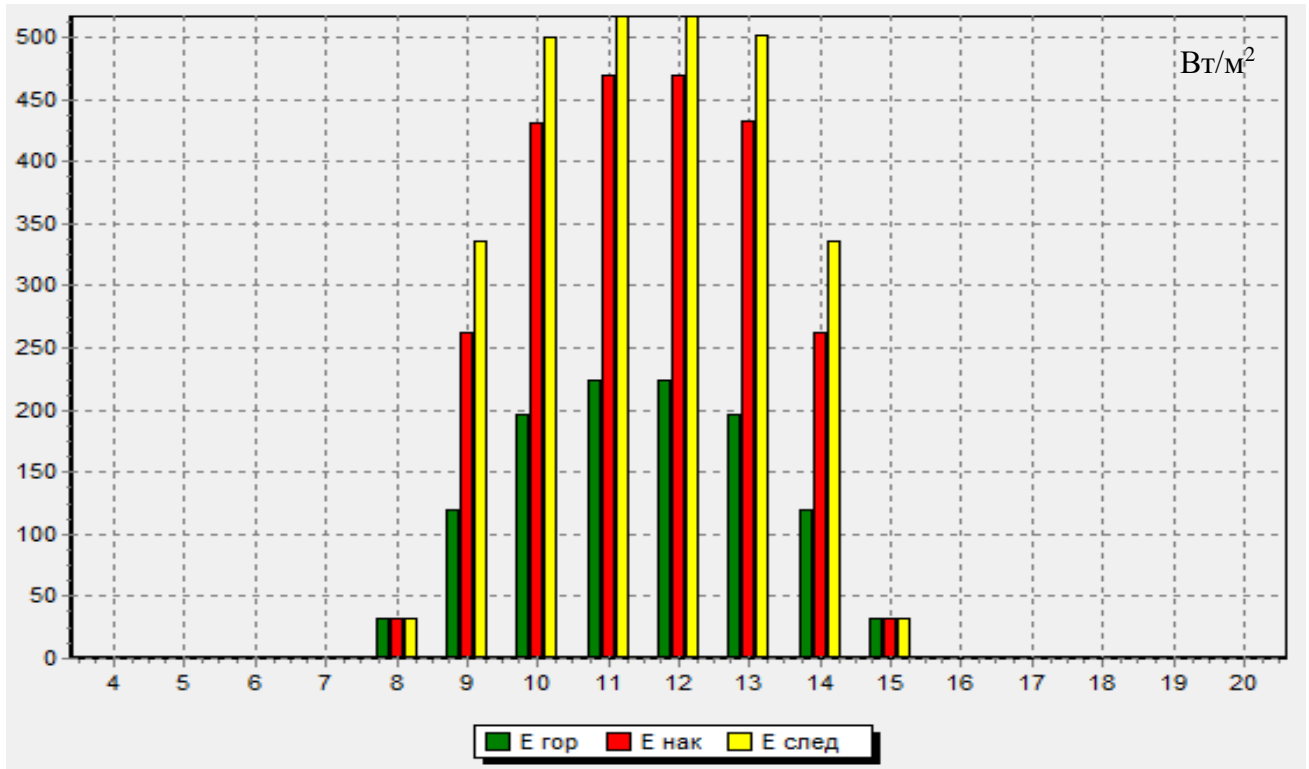


б)

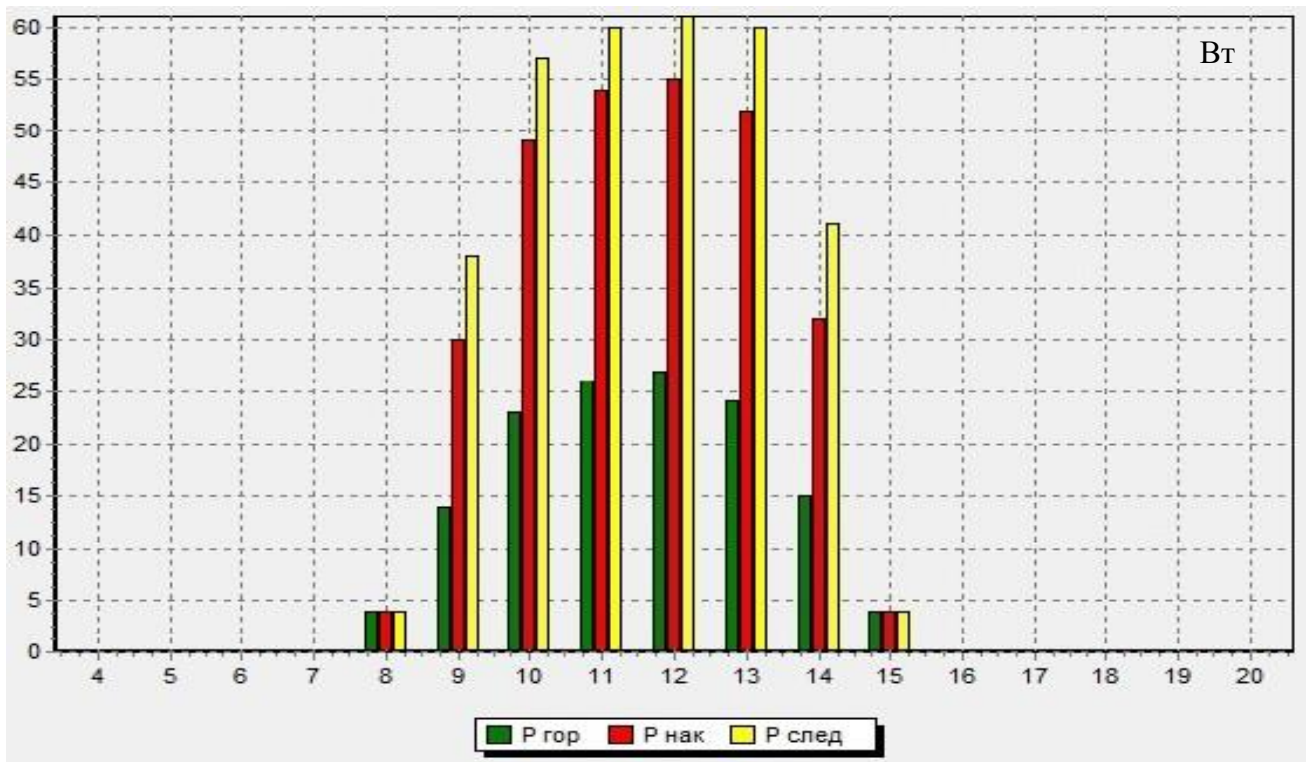
Рисунок 4.3 – Прогнозируемые значения параметров на различные поверхности

в п. Качык для 15-ого июля:

а) изменений интенсивности СИ; б) мощности ФЭП «SilaSolar 200 Вт»



а)



б)

Рисунок 4.4 – Прогнозируемые значения параметров на различные поверхности в п. Качык для 15-ого января:

а) изменений интенсивности СИ; б) мощности ФЭП «SilaSolar 200 Вт»

Суммарное прогнозируемое значение выходной мощности ФЭП «SilaSolar 200 Вт» в п. Качык для 15-ого января для горизонтально расположенной ФЭП составило 0,137 кВт, для наклонной ФЭП составило 0,28 кВт, для следящей ФЭП – 0,325 кВт. Суммарное прогнозируемое значение интенсивности СИ в п. Качык для 15-ого июля для горизонтально расположенной ФЭП составило 1,705 кВт/м², для наклонной ФЭП составило 1,759 кВт/м², для следящей ФЭП – 2,421 кВт/м².

4.3.1 Оптимизация структуры и параметров СДУ на примере поселка Кызыл-Хая

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 (рисунок 4.5).

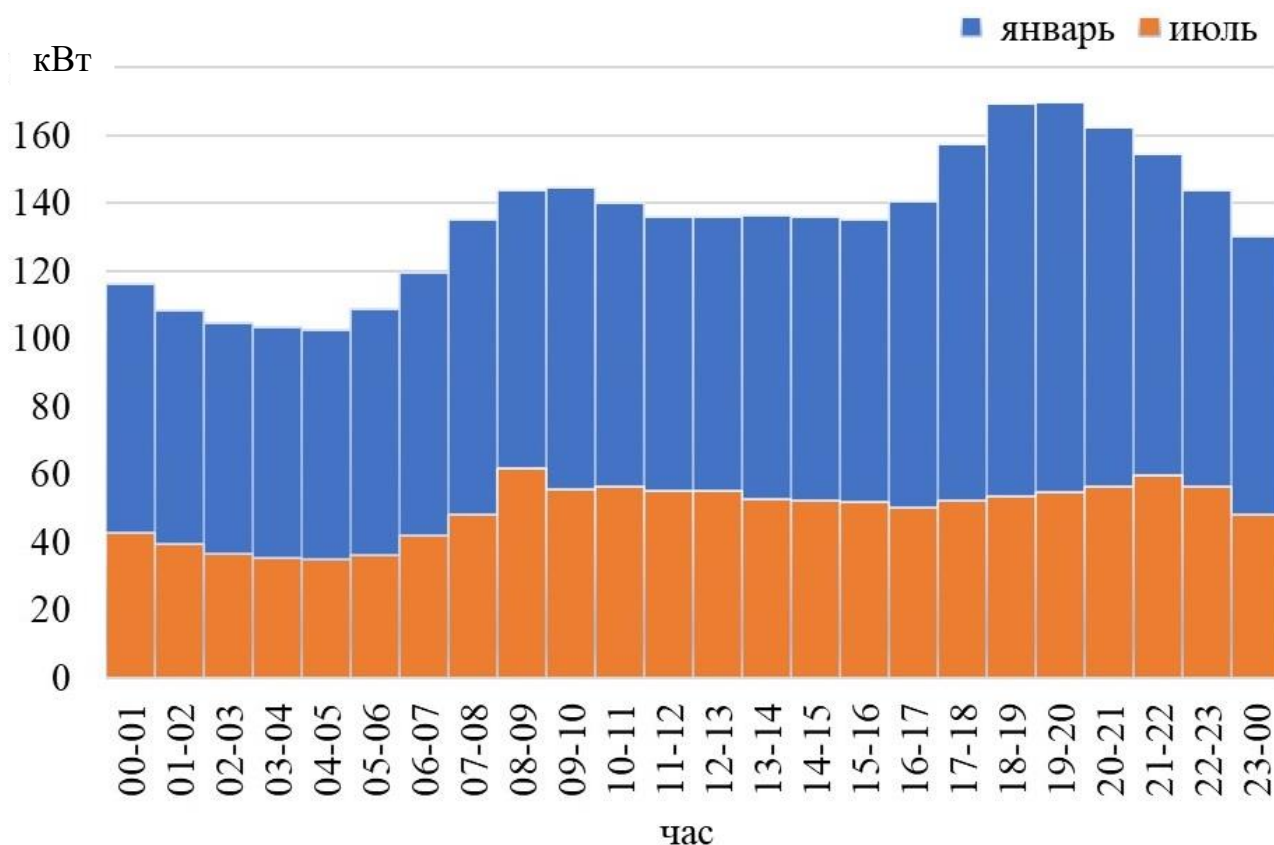


Рисунок 4.5 – Типовые графики нагрузок п. Кызыл-Хая

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 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, выполненной по методике (пункт 3.1), получены следующие структура и параметры элементов СДУ, представленные в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – 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 вариантов в результате оптимизации структуры и параметров СДУ в п. Кызыл-Хая представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – 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 4.3.

Таблица 4.3 – Результаты расчетов технико-экономических показателей 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 %.

4.3.2 Оптимизация структуры и параметров СДУ на примере поселка Кунгуртуг

Поселок Кунгуртуг 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 Кунгуртуг, выполненной по методике (пункт 3), получены следующие структура и параметры элементов СДУ, представленные в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – 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 вариантов в результате оптимизации структуры и параметров СДУ в Кунгуртут представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – 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 Кунгуртут представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – 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 %.

4.4 Обоснование выбора площадок для размещения элементов СДУ

Выбор площадки для размещения элементов СДУ с использованием теории многокритерийной оптимизации и метода экспертных оценок произведен на примере поселка Кунгуртуг (Республика Тыва). Анализ территории вокруг поселка позволил предложить четыре варианта размещения площадок, представленных на рисунке 4.5:

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.



Рисунок 4.6 – Общий вид с. Кунгуртуг со спутника с вариантами размещения площадок для СДУ

Для выбора варианта площадки для размещения элементов СДУ на основе обобщения имеющегося опыта и опроса шести компетентных экспертов был определен следующий перечень КС:

- Максимум удобства монтажа и обслуживания СДУ.
- Максимум благоприятного рельефа местности и качества грунта.
- Максимум удобства компоновки ФЭП.

- Минимум воздействия на окружающую среду.
- Максимум возможности дальнейшего расширения СДУ.
- Максимум возможности ориентации ФЭП преимущественно на юг и отсутствия высоких препятствий для СИ.

В таблице 4.7 представлены оценки весомостей КС v_i , полученные методом ранговой корреляции и матрица оценочных рангов КС, данных шестью экспертами.

Таблица 4.7 – Матрица рангов оценки весомостей КС

Эксперт	КС и их ранги					
	КС 1	КС 2	КС 3	КС 4	КС 5	КС 6
1	1	4,5	4,5	6	3	2
2	1,5	3	1,5	4	6	5
3	2,5	2,5	4	5	6	1
4	2	3	4	6	5	1
5	1	3	2	6	4	5
6	2	4	5	6	3	1
Сумма рангов A_i	10	20	21	33	27	15
v_i	0,255	0,175	0,167	0,070	0,118	0,215
A_{cp}	21					
ΔA_i	-11	-1	0	12	6	-6
$(\Delta A_i)^2$	121	1	0	144	36	36
ΔA_{Σ}	338					

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. Таким образом,

с достоверностью 95 % можно утверждать, что коэффициент согласия значим, и имеет место согласованность экспертов.

В результате ранжирования вариантов площадок каждым экспертом получены относительные оценки эффективности первого КС:

$$e_{11}= 0,812; e_{12}=0,417; e_{13}=0,687; e_{14}=0,583 \text{ (табл.4.8).}$$

Таблица 4.8 – Матрица рангов для первого КС

Эксперт	Вариант площадки			
	1	2	3	4
1	1	3	4	2
2	1	4	2	3
3	2,5	2,5	2,5	2,5
4	4	3	1	2
5	1	3,5	2	3,5
6	1	4	2	3

Экспертным путем получены относительные оценки эффективности второго, четвертого и шестого КС. Используя численные оценки длин силовых кабелей, соединяющих ФЭП с инвертором и величины свободных площадей для перспективного расширения, получили относительные оценки эффективности третьего и пятого КС у каждого варианта СДУ. По формулам линейного преобразования выполнен переход численных показателей в относительные оценки в диапазоне [0,1].

Результаты многокритериальных оценок эффективности вариантов, рассчитанные для среднеарифметической, гармонической форм свертки приведены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Многокритериальная оценка эффективности вариантов площадок для размещения элементов СДУ с. Кунгуртуг

№ варианта	Оценки весомостей КС						Форма свертки	
	$v_1=0,255$	$v_2=0,175$	$v_3=0,167$	$v_4=0,07$	$v_5=0,118$	$v_6=0,215$		
	Оценка частных критериев e_{ij}						$F^*_{срА}$	$F^*_Г$
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	0,700	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 по многокритериальной оценке, эффективности позволяет выбрать 2-й вариант площадки для поселка Кунгуртуг, у которого наибольшие значения многокритериальной оценки $F^*_{срА}$ и $F^*_Г$.

Выводы по главе 4

1. Сравнение результатов рассчитанных значений изменения интенсивности прямого и рассеяного СИ на горизонтальную поверхность с наблюдаемыми данными актинометрической станции на территории Республики Тыва показало общую среднеквадратичную ошибку не более 9 %. По результатам расчета среднегодовых значений интенсивности СИ на горизонтальную поверхность произведено районирование территории Республики Тыва по двум солнечным зонам.

2. Для изолированного поселка Республики Тыва рассчитаны прогнозируемые значения изменений интенсивности СИ и мощности ФЭП «SilaSolar 200 Вт» при различных способах ориентации ФЭП.

3. Получены практические результаты оптимального выбора параметров и структуры СДУ на примере двух изолированных поселков Республики Тыва:

использование оптимальной структуры СДУ в АСЭС дает возможность снизить потребление дизельного топлива на 60 % в поселке Кунгуртуг и на 47 % в поселке Кызыл-Хая; а так же уменьшить себестоимость электрической энергии с 51 до 26 руб./кВт в поселке Кунгуртуг и с 46 до 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.

4. Произведен выбор площадки для размещения элементов СДУ на основе многокритериального подхода с использованием теории многокритерной оптимизации и метода экспертных оценок на примере поселка Кунгуртуг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложена методика расчёта интенсивности СИ, основанная на методе Берда и дающая максимальные расхождения расчетных значений с наблюдаемыми данными для актинометрической станции в г. Кызыле около 9 %. Согласно результатам расчета среднегодовых значений интенсивности СИ на горизонтальную поверхность, произведено районирование территории Республики Тыва по двум солнечным зонам.

2. Усовершенствована математическая модель ФЭП, позволяющая определить выходные энергетические характеристики ФЭП с учетом интенсивности СИ, 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 СИ 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 учетом изменения реальной величины выработки электрической энергии ФЭП и графиков нагрузки потребителя. 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 Кунгуртут и 32 руб./кВт в поселке Кызыл-Хая; денежный эквивалент «вытесненному» топливу составил в поселке Кунгуртут 2555,95 тыс. руб., в поселке Кызыл-Хая – 6142,5 тыс. руб.

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

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. 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.

2. О внесении изменений в государственную программу Республики Тыва "Энергоэффективность и развитие энергетики на 2014–2025 годы" [Текст]: постановление Правительства Республики Тыва от 30 марта 2021 г. № 152 // Правительство Республики Тыва. – 2021. – 29 с.

3. 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.

4. Лукутин, Б.В. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении: монография / Б.В. Лукутин, О.А. Суржикова, Е.Б. Шандарова. — М. : Энергоатомиздат. – 2008. — 231 с.

5. Кенден, К.В. Дизель-солнечные установки для электроснабжения отдаленных районов 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. Амурский государственный университет. – 2013. – С. 282–286.

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

7. 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.

8. 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.

9. Isolated power system in Russia: A chance for renewable energies? / P. Lombardi, T. Sokolnikova, K. Suslov [et al.] // Renewable Energy. – 2016. – Vol. 90. – P. 532-541.

10. Суслов К.В. Развитие систем электроснабжения изолированных территорий России с использованием возобновляемых источников энергии / К.В. Суслов // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21. – № 5 (124). – С.131–142.

11. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года [Текст]: распоряжение Правительства Республики Тыва от 9 июня 2020 г. № 1523-р // Правительство Республики Тыва. – 2021. – 93 с.

12. Федеральное государственное бюджетное учреждение «Среднесибирское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://meteo.krasnoyarsk.ru>

13. Рекомендации по развитию альтернативных источников энергии для сельских районов Республики Тыва. – Красноярск: WWF России, Oxfam – GB, AEnergy.ru. – 2011 – 44 с.

14. Котельников, В.И. Расчет гидроэнергетического потенциала рек на территории Тувы с помощью ГИС / В.И. Котельников, С.А. Чупикова // Международный журнал экспериментального образования. – 2015 – № 6. – С. 55–459.

15. 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.

16. Кенден, К.В. Анализ использования перспективных видов энергии в Республике Тыва / К.В. Кенден // Вестник Тувинского государственного университета. Технические и физико-математические науки. – 2012 – № 3. – С. 68–71.

17. 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.

18. 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.

19. Бастрон, А.В. Районирование Красноярского края, республик Хакасия и Тыва по ветровым зонам / А.В. Бастрон, А.В. Чебодаев / Промышленная энергетика. 2002. – № 8. – С. 48–52.

20. 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.

21. 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.

22. 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.

23. 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.

24. Попель, О. С. Атлас ресурсов солнечной энергии на территории России / О.С. Попель, С.Е. Фрид, Ю.Г. Коломиец, С.В. Киселева, Е.Н. Терехова // Москва : Изд-во МФТИ. – 2010. – 83 с.

25. 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.

26. Об электроэнергетике: Федеральный закон № 35 от 26 марта 2003 г.: [принят Государственной Думой 21 февраля 2003 г.]. – URL : <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 05.02.2020).

27. О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики: Указ Президента РФ от 4 июня 2008 г. № 889 – URL : <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 05.02.2020).

28. Политика России в области возобновляемых источников энергии: пробуждение зеленого великана: Программа развития возобновляемых источников энергии в России – URL : <https://web.worldbank.org> (дата обращения: 05.02.2020).

29. О схемах и программах перспективного развития электроэнергетики [Текст]: постановление Правительства РФ от 17 октября 2009 г. N 823 – URL : <http://www.consultant.ru> (дата обращения: 05.02.2020).

30. Аронова, Е.С. Методика расчета реальной плотности солнечного излучения при проектировании фотоэлектрических энергоустановок. [Текст] / Е.С. Аронова, В.А. Грилихес // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – СПб. – 2006. – № 6. – Т. 1. Естественные и технические науки – С. 62–66.

31. 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.

32. 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 (152). – С. 616–626.

33. Ekren, B.Y., Ekren O. Simulation based size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage under various load and auxiliary energy conditions// Applied Energy. – 2009. – Vol. 86. – pp. 1387–1394.

34. BaskarD. Efficiency Improvement on Photoltaic Water Pumping System by Automatic Water Spraying over Photovoltaic Cells // Middle-East Jornal of Scientific Research. – 2014. – Vol. 19(8).– pp. 1127–1131.

35. Ranjeva M., Kulkarnia A.K. Design Optimization of a Hybrid, Small, Decentralized Power Plant for Remote/rural areas // Energy Procedia. – 2012. – Vol. 20. – pp. 258–270.

36. Ekren O., Ekren B.Y. Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using response surface methodology // Applied Energy. – 2008. – Vol. 85. – pp. 1086–1101.

37. Dufo-López R., Bernal-Agustín J.L., Yusta-Loy J.M., Domínguez-Navarro J.A., Ramírez-Rosado I.J., Lujano J., Aso I. Multiobjective optimization minimizing cost and life cycle emissions of stand-alone PV-wind-diesel systems with batteries storage // *Applied Energy*. – 2011. – Vol. 88. – pp. 4033–4041.
38. Togola I., Burrell T., Sokona Y. A New Sustainable Energy Path for African Development: Think Bigger Act Faster, EDRC/ENDA // *Energy and Development Research Centre, University of Cape Town South*. – 2002. – pp. 52–54.
39. Nogueira C.E.C., Vidotto M.L., Niedzialkoski R.K., Souza S.N.M., Chaves L.I., Edwiges T., Santos D.B., Werncke I. Sizing and simulation of a photovoltaic-wind energy system using batteries, applied for a small rural property located in the south of Brazil // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2014. – Vol. 29. – pp. 151–157.
40. Merei G., Berger C., Sauer D.U. Optimization of an off-grid hybrid PV-Wind-Diesel system with different battery technologies using genetic algorithm // *Solar Energy*. – 2013. – Vol. 97. – pp. 460–473.
41. Krismadinata, Rahim N.A., Ping H.W., Selvaraj J. Photovoltaic Module Modeling using Simulink/Matlab // *Procedia Environmental Sciences*. – 2013. – Vol. 17. – pp. 537–546.
42. Villalva M. G., Gazoli J.R., Filho E.R. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – 2009. – Vol. 24. – pp. 1198–1208.
43. Fathima A.H., Palanisamy K. Optimization in microgrids with hybrid energy systems - A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2015. – Vol. 45. – pp. 431–446.
44. Козюков, Д.А. Моделирование характеристик фотоэлектрических модулей в Matlab/SIMULINK / Д.А. Козюков, Б.К. Цыганков // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. – 2015. – № 112 – С. 1577–1593.
45. Шиняков, Ю.А. Повышение энергетической эффективности автономных фотоэлектрических энергетических установок / Ю.А. Шиняков, Ю.А.

Шурыгин, О.Е. Аркатова // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2010. – № 2–2(22). – С. 102–107.

46. Юрченко, А. В. Статистическая модель кремниевых солнечных батарей, работающих под воздействием природных и аппаратных факторов / А. В. Юрченко, А. В. Волгин, А. В. Козлов // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – № 4. – С. 142–148.

47. Ярмухаметов, У.Р., Ахметшин, А.Т. Имитационное моделирование режимов работы солнечных установок с фотоэлектрическими преобразователями в зависимости от внутренних и внешних факторов в среде MATLAB/SIMULINK / У.Р. Ярмухаметов, А.Т. Ахметшин // Вестник Кр-асГАУ. – 2014. – № 8. – С. 195–200.

48. Бастрон, А.В. Обработка результатов исследования характеристик солнечных фотоэлектрических станций и определение рациональных режимов работы при изменении угла наклона и спектрального состава облучения фотоэлектрических модулей / А.С. Дебрин, А.В. Бастрон, А.Ф. Семенов, Т.П. Пашкевич // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2019. – № 6 (80). – С. 175–179.

49. Thomachan A., Kattakayam, Srinivasan K. Lead acid batteries in solar refrigeration systems // Renewable Energy. – 2004. – Vol. 29. – pp. 1243–1250.

50. Tremblay O., Dessaint L., Dekkiche A. A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles // Vehicle Power and Propulsion Conference. – 2007. – pp. 284–289.

51. Tremblay O., Dessaint, L-A. Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications // World Electric Vehicle Journal. – 2009. – Vol. 3. – pp. 289–298.

52. Kuhn E., Forgez C., Lagonotte P., Friedrich G., Modelling Ni-MH battery using Cauer and Foster structures // Journal of Power Sources. – 2006. – Vol. 158. – pp. 1490–1497.

53. Обухов, С.Г. Имитационная модель режимов работы автономной фотоэлектрической станции с учетом реальных условий эксплуатации / С.Г.

Обухов, И.А. Плотников // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – № 6. – С. 38–51.

54. Maleki A, Pourfayaz F. Optimization of grid independent diesel-based hybrid system for power generation using improved particle swarm optimization algorithm // International Journal of smart electrical engineering. – 2015. – Vol. 4. – pp. 29–36.

55. Suchitra B., Utthra R., Jegadeesan R., Tushar B. Optimization of a hybrid stand-alone power system using Multi-objective genetic algorithm // Transactions on Electronics Engineering. – 2013. – Vol. 1. – pp. 114–120.

56. 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.

57. 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.

58. Banos R., Manzano-Agugliaro F., Montoya F.G., Gil C., Alcayde A., Gomez J. Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2011. – Vol. 15. – pp. 1753–1766.

59. Yang H, Zhou W, Lu L, Fang Z. Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar-wind system with LPSP technology by using genetic algorithm // Solar Energy. – 2008. – Vol. 82. – pp. 354–367.

60. Khatib T., Mohamed A., Sopian K. Optimization of a PV/wind micro-grid for rural housing electrification using a hybrid iterative/genetic algorithm: Case study of Kuala Terengganu, Malaysia // Energy and Buildings. – 2012. – Vol. 47. – pp. 321–331.

61. Hakimi S.M., Moghaddas-Tafreshi S.M. Unit sizing of a stand-alone hybrid power system using particle swarm optimization (PSO) // International Power Engineering Conference. – 2007. – pp. 18–21.
62. MoghaddasTafreshi S. M., Hakimi S. M. Optimal sizing of a stand-alone hybrid power system via particle swarm optimization (PSO) // International Power Engineering Conference. – 2007. – pp. 960–965.
63. Ekren O, Ekren B.Y Size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage using simulated annealing // Applied Energy, Elsevier. – 2010. – Vol. 87. – pp. 592–598.
64. Yoo J.H. Maximization of hydropower generation through the application of a linear programming model // Journal of Hydrology. – 2009. – Vol. 376. – pp. 182–187.
65. Kalogirou S.A. Optimization of solar systems using artificial neural-networks and genetic algorithms // Applied Energy, Elsevier. – 2004. – Vol. 77. – pp. 383–405.
66. Arribas L., Bopp G., Vetter M., Lippkau A., Mauch.K. World-wide overview of design and simulation tools for hybrid PV systems // Netherlands: . – 2011. – 29 p.
67. RETScreen. Интернет сайт. – Адрес доступа: <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-and-publications/tools/modelling-tools/retscreen/7465> (Дата обращения: 11.12.2020 г.).
68. PV*SOL. Интернет сайт. – Адрес доступа: <https://pvsol.software/en/> (Дата обращения: 11.12.2020 г.).
69. BatteryandEnergyTechnologies Интернет сайт. – Адрес доступа: <http://www.pvsyst.com/5.2/index.php> (Дата обращения: 11.12.2020 г.).
70. Hybrid2. Интернет сайт. – Адрес доступа: <https://www.umass.edu/windenergy/research/topics/tools/software/hybrid2> (Дата обращения: 11.12.2020 г.).
71. PV-DesignPro. Интернет сайт. – Адрес доступа: <https://www.capterra.com/p/87533/PV-DesignPro/> (Дата обращения: 11.12.2020 г.).

72. Homer Energy. Интернет сайт. – Адрес доступа: <http://www.homerenergy.com/> (Дата обращения: 11.12.2020 г.).
73. Аунг Ко, Малинин Н.К., Шестопалова Т.А. Разработка специального математического обеспечения для решения проблемы комплексного энерго-, тепло- и хладоснабжения автономных сельских потребителей в Мьянме. // Жур. Новое в российской электроэнергетике. : М. – № 12. – 2017. – С.10–16.
74. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Многолетние данные. – Л. : Гидрометеиздат. – 1990. – 291 с
75. Пивоварова, З.И. Климатические характеристики солнечной радиации как источника энергии на территории СССР / З.И Пивоварова, В.В. Стадник – Ленинград: Гидрометеиздат. – 1988. – 291 с.
76. Атласы ветрового и солнечного климата России / под ред. М.М. Борисенко, В.В. Стадник. – Л.: Гидрометеиздат. – 1997. – 173 с.
77. Meteororm Einstrahlungsdaten für jeden Ort des Planeten. Typische Jahre und historische Zeitreihen – einfach abrufbar mit der Meteororm. – Режим доступа: <https://meteororm.com>
78. Natural Resources Canada. – Режим доступа: <https://www.nrcan.gc.ca/energy/retscreen/7465>
79. The NASA Surface Meteorology and Solar Energy Data Set center. – Режим доступа: <http://easweb/larc.nasa.gov/sse/>.
80. Кириченко, Н. В. Анализ результатов моделирования температуры неизолированных проводов воздушных линий электроэнергетических систем с учетом влияния солнечной радиации / Н. В. Кириченко, Е. В. Петрова // Омский научный вестник. – 2013. – № 1(117). – С. 164–168.
81. Виссарионов, В.И. Расчет ресурсов солнечной энергетики // В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина, В.А. Кузнецова, Н.К. Малинин. – М.: Изд-во МЭИ. – 1998. – 60 с.
82. Abdul Q. J., Saleem R.S., Andrew R.H.R., Shakeel A.K. Selection of Models for Calculation of Incident Solar Radiation on Tilted Surfaces // World Applied Sciences Journal. – 2013. – Vol. 22. – pp. 1334–1343.

83. Bird R. A., Hailstorm R.L. Simplified clear sky model for direct and diffuse insulations on horizontal surfaces // Solar Energy Research Institute. – 1981. – 46 p.
84. Шерьязов, С. К. Методические основы определения мощности гелио- и ветроэнергетических установок / С. К. Шерьязов // Техника в сельском хозяйстве. – 2000. – № 3. – С. 36–39.
85. Безруких, П. П. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России: монография / П. П. Безруких, Ю. Д. Арбузов, Г. А. Борисов, В. И. Виссарионов, и др. // Санкт-Петербург.: Изд-во «Наука». – 2002. – 314 с.
86. 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.
87. Gueymard C.A. Direct solar transmittance and irradiance predictions with broadband models. Part I: detailed theoretical performance assessment // Solar Energy. – 2003. – Vol. 74 – №5. – pp. 335–379.
88. Григорьев, А.С. Выбор критериев оптимизации при разработке гибридных установок на основе солнечных модулей для электропитания локальных удаленных потребителей промышленно-бытового назначения / А.С. Григорьев , С.А. Григорьев , Ю.В. Кухмистров , Ю.А. Нечаев// Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2011. – № 12 (104). – С. 39–48.
89. Burgelman M., Minnaert B. Including excitons in semiconductor solar cell modeling // Thin Solid Films. – 2006. – Vol. 511–512. – pp. 214–218.
90. Афанасьев, В. П. Тонкопленочные солнечные элементы на основе кремния / В. П. Афанасьев, Е. И. Теруков, А. А. Шерченков . – 2-е изд. – СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ» . – 2011. – 168 с.
91. 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.

92. Кенден, К.В. Определение выработки электроэнергии фотоэлектрической установкой с учетом 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.

93. Akbar M., Fathollah P. Optimization of grid independent diesel-based hybrid system for power generation using improved particle swarm optimization algorithm // 30th International Power System Conference (PSC). – 2015 pp. 111–117.

94. Bernal-Agustin J. L., Dufo-Lypez R., Rivas-Ascaso D.M. Design of isolated hybrid systems minimizing costs and pollutant emissions // Renew Energy. – 2006. – Vol. 31. – pp. 2227–2244.

95. Сурков, М.А. Разработка и применение экспериментального программного комплекса для оценки комбинированного использования ВИЭ / М.А. Сурков, А.М. Пупасов-Максимов, Д.Е. Чернов // Интернет-журнал «Науковедение». – 2012. – № 2. – С. 1–11.

96. Brenna M., Foiadelli F., Longo M., Abegaz T.D. Integration and optimization of renewable and storages for rural electrification // Sustainability. – 2016. – Vol. 8. – pp. 1–18.

97. Карамов, Д.Н. Комплексная оптимизация автономной системы электроснабжения, использующей возобновляемые источники энергии и аккумулирующие устройства на примере п. «Батамай» Кобяйского района Якутии / Д.Н. Карамов // Сборник трудов всероссийской конференции «Энергетика России в XXI веке: Инновационное развитие и управление». – 2015. – С. 582–590.

98. Гапоненко, А.М. Оптимизация состава комплекса возобновляемых источников энергии с использованием кластерного подхода и теории случайных процессов / А.М. Гапоненко, А.А. Каграманова // Политематический сетевой

электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2016. – № 116. – С. 1–16.

99. Rout K., Sahu J.K. Various Optimization Techniques of Hybrid Renewable Energy Systems for Power Generation: A Review // International Research Journal of Engineering and Technology. – 2018. – Vol. 5. – pp. 1173–1176.

100. Bhandari B., Lee K-T., Lee G-Y., Cho Y-M., Ahn S-H. Optimization of hybrid renewable energy power systems: A review // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. – 2015. – Vol. 2. – pp. 99–112.

101. Ogunjuyigbe A.S.O., Ayodele T.R., Akinola O.A. Optimal allocation and sizing of PV/Wind/Split-diesel/Battery hybrid energy system for minimizing life cycle cost, carbon emission and dump energy of remote residential building // Applied Energy, Elsevier. – 2015. Vol. 171. – pp. 153–171.

102. Askarzadeh A. A novel solution for sizing a photovoltaic/diesel hybrid power generation system for isolated sites // IET Renewable Power Generation. – 2017. – Vol. 11. – pp. 143–151.

103. Wagh M., Kulkarni V.V. Modeling and Optimization of Integration of Renewable Energy Resources (RER) for Minimum Energy Cost, Minimum CO₂ Emissions and Sustainable Development, in Recent Years: A Review // Materials today: Proceedings. – 2016. – Vol. 5. – pp. 11–21.

104. Колюхов, В.Ю. Техничко-экономические аспекты применения возобновляемых источников энергии / В.Ю. Колюхов, Т.И. Зими́на, К.В. Су́слов, Н.А. Шама́рова – Иркутск: Изд-во ИрГТУ. – 2014. – 220 с.

105. Оськин, С. В. Техничко-экономическая оценка эффективности эксплуатации электрооборудования / С. В. Оськин, Г. М. Оськина // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2006. – № 1. – С. 2–3.

106. 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. – Т.9. – № 1. – С. 39–49.

107. 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.

108. 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.

109. Lee A.H.I., Kang H-Y., Liou Y-J. A hybrid multiple-criteria decision-making approach for photovoltaic solar plant location selection // Sustainability. – 2017. – Vol. 9. – 184 p.

110. Akkaş O.P., Erten M.Y., Çam, E., Inanç, N. Optimal Site Selection for a Solar Power Plant in the Central Anatolian Region of Turkey // International Journal of Photoenergy. – 2017. – 13 p.

111. Bakhtavar E., Lotfian R. Applying an integrated fuzzy gray MCDM approach: A case study on mineral processing plant site selection // International Journal of Mining and Geo-Engineering. – 2017. – Vol. 51. – pp. 177–183.

112. Ghasempoura R., Nazaria M. A., Ebrahimia M., Ahmadib M. H. Hadiyanto H. Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Approach for Selecting Solar Plants Site and Technology: A Review // International Journal of Renewable Energy Development. – 2019. – Vol. 8. – pp. 15–25.

113. Saracoglu B.O., Ohunakin O.S., Adelekan D.S., Gill J., Atiba O.E., Okokpujie I.P., Atayero A.A. A framework for selecting the location of very large photovoltaic solar power plants on a global/supergrid // Energy Reports. – 2018. – Vol. 4, pp. 586–602.

114. Yousefi H., Hafeznia H., Yousefi-Sahzabi A. Spatial Site Selection for Solar Power Plants Using a GIS-Based Boolean-Fuzzy Logic Model: A Case Study of Markazi Province, Iran // *Energies* . – 2018. – Vol. 11. – 1648 p.

115. Артемьев, А.Ю. Методика принятия решений при выборе района для размещения ВЭС с учетом неопределённости в отношении критериальных оценок / А.Ю. Артемьев // *Системные исследования в энергетике: Труды молодых ученых ИСЭМ СО РАН*. – 2016. – № 46. – С. 98 – 105.

116. Панкратьев, П.С. Размещение тепловой электростанции в районе с децентрализованным электроснабжением в условиях многокритериальности с учетом неточно выраженных предпочтений лиц, принимающих решение / П.С. Панкратьев // *Вестник ИрГТУ*. – 2019. – № 1. – С. 320–334.

117. Шакиров, В.А. Выбор пункта строительства электростанции в условиях риска методом анализа иерархии / В.А. Шакиров, П.С. Панкратьев // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. – 2014. №4 (44). – С. 141–147.

118. Воропай, Н.И. Обоснование развития электроэнергетических систем / Н.И. Воропай, С.В. Подковальников, В.В. Труфанов, и др. // *Новосибирск: Наука*. – 2015. – 448 с.

119. Сайфулина, К.Э. Принятие решения в условиях неопределенности: стратегии исследования и использования / К.Э. Сайфулина, Г.Л. Козунова, В.А. Медведев, А.М. Рытикова, Б.В. Чернышев // *Современная зарубежная психология*. – 2020. – № 2. – С. 93–106.

120. Акоф, Р.Л. Основы исследования операций / Р. Л. Акофф, М. В. Сасиени ; Пер. с англ. и предисл. В. Я. Алтаева ; Под ред. И. А. Ушакова. – Москва : Мир, 1971. – 534 с.

121. Бешелев, С.Д. Математико-статистические методы экспертных оценок / С.Д. Бешелев, Ф.Г. Гурвич. – М. : Статистика, 1974. – 160 с.

122. Хорошев, Н.И. Экспертный метод оценки надежности электротехнического оборудования при принятии управленческих решений / Н.И.

Хорошев, А.Б. Петроченков, А.В. Ромодин // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2009. – № 4. – С. 161–164.

123. Азгальдов, Г.Г. О квалиметрии / Г.Г. Азгальдов, Э.П. Райхман // М. : Изд-во стандартов – 1973. – 172 с.

124. Кини, Р.Л. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / Р.Л. Кини, Х. Райфа // М.: Радио и связь – 1981. – 560 с.

125. Гук, Ю.Б. Комплексный анализ эффективности технических решений в энергетике / Ю.Б. Гук, П.П. Долгов, В.Р. Огороков и др. // ред. В.Р. Огороков и Д.С. Щавелев. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние. – 1985. – 176 с.

Приложение А

Справка о внедрении результатов диссертационного исследования



Министерство топлива и энергетики
Республики Тыва

« 14 » мая 2021 г.

№ РК-868

Кызыл

АКТ О ВНЕДРЕНИИ

**результатов диссертационной работы «Совершенствование методов
принятия решений по вводу мощностей автономных солнечно-
дизельных установок (на примере Республики Тыва)»
на соискание ученой степени кандидата технических наук
Кенден Кара-кыс Владимовны**

Использование результатов диссертационной работы Кенден К.В. на тему «Совершенствование методов принятия решений по вводу мощностей автономных солнечно-дизельных установок (на примере Республики Тыва)» Министерством топлива и энергетики Республики Тыва заключается в следующем:

- Использование программно-вычислительных комплексов «Программа расчета прогнозируемых значений вырабатываемой мощности фотоэлектрического преобразователя» и «Оптимизация структуры автономных систем электроснабжения на основе солнечно-дизельных установок» при проектировании автономных гибридных солнечно-дизельных энергоустановок на территории Республики Тыва.

- Верификация программно-вычислительных комплексов на основе реальных данных функционирующей автономной гибридной солнечно-дизельной энергоустановки в п. Кызыл-Хая.

Предлагаемые программно-вычислительные комплексы могут быть использованы при реализации основных технических решений по инвестиционному проекту «Строительство солнечной станции в п. Кушуртуг».

Министр топлива и энергетики
Республики Тыва



Р.В. Кажин-оол

Приложение Б

Справка о внедрении результатов диссертационного исследования



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФГБОУ ВО «ТУВИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**



АКТ

**об использовании результатов диссертационной работы
на соискание ученой степени кандидата технических наук
Кенден Кара-кыс Вадимовны в учебном процессе
Тувинского государственного университета**

Комиссия в составе:

председателя – А.С. Кысыдак, к.т.н., доцента, заведующей кафедрой
«Общеинженерные дисциплины»

членов комиссии: А.Х. Дадар, к.т.н., доцента, А.С. Сандан, к.т.н., доцента


составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы
«Совершенствование методов принятия решений по вводу мощностей
автономных солнечно-дизельных установок (на примере Республики Тыва)»,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук,
используются при проведении лекционных и практических занятий по курсу
«Возобновляемые источники энергии» Тувинского государственного
университета.

Председатель комиссии:

 А.С. Кысыдак

Члены комиссии:

 А.Х. Дадар

 А.С. Сандан

Приложение В

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО
о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019613429

**Программа расчета прогнозируемых значений
вырабатываемой мощности фотоэлектрического
преобразователя**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования "Тувинский
государственный университет" (RU)*

Автор: *Кенден Кара-кыс Вадимовна (RU)*

Заявка № **2019610563**
Дата поступления **24 января 2019 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **18 марта 2019 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 **Г.П. Ильин**



Приложение Г

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2019614383

**Оптимизация структуры автономных систем
электроснабжения на основе солнечно-дизельных установок**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования "Тувинский
государственный университет" (RU)*

Авторы: *Кенден Кара-кыс Вадимовна (RU),
Кузнецов Александр Викторович (RU)*

Заявка № 2019610580

Дата поступления 24 января 2019 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 03 апреля 2019 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.И. Назиев Г.И. Назиев

Приложение Д

Технические и экономические характеристики оборудования при оптимизации
состава АСЭС на основе СДУ

Таблица Д.1 - Технические и экономические характеристики ФЭП

Тип	Модель	Мощность, кВт	Напряжение холостого хода, В	Ток короткого замыкани я, А	Срок службы, лет	Стоимость единицы, руб.
Поликристаллический	PSIP100-5BB	0,1	21,6	5,95	25	4,08
	PSIP150-5BB0	0,15	21,86	8,74	25	5,44
	PSIP200-24-5BB	0,2	43,8	5,84	25	7,22
	PSIP250-5BB	0,25	36,99	8,62	25	8,35
	PSIP300-5BB	0,3	45	8,64	25	10,9
Монокристаллический	MSIM100-5BB	0,1	22,2	5,74	30	4,69
	MSIM150-5BB	0,15	21,72	8,79	30	6,45
	MSIM200-24	0,2	43,93	5,8	30	8,99
	MSIM250-24- 5BB	0,25	36,99	8,62	30	10,3
	MSIP300-5BB	0,3	43,3	8,82	30	12,5

Таблица Д.2 – Технические и экономические характеристики АБ

Тип	Модель	Емкость , А·ч	Напряжени е, В	Срок службы, лет	Стоимость единицы, руб.
Gel	Delta DTM 12100 L	100	12	12	14,5
	DTM12200L	200	12	12	28,4
	DTM12230L	230	12	12	32,7
	GX12-100	100	12	12	16,5
	GX12-200	200	12	12	30,9
	GX12-230	230	12	12	9,9
	AKBSW100A	100	12	12	14,2
	AKBSW200A	200	12	12	27,5
AGM	AGM OSB 12-72	72	12	10-12	10,1
	AGM OSB 12- 100	100	12	10-12	13,3
	DJM1250	50	12	12-15	7,1
	DJM12975	75	12	12-15	10,9
	DJM12100	100	12	12-15	13,9
	DJM12150	150	12	12-15	21,6
	DJM12200	200	12	12-15	27,9
	ChA12-100A	100	12	12	14
	ChA12-200	200	12	12	28,8
	FIAMM12FGL55	55	12	10	10,8
	FIAMM12FGL10 0	100	12	10	16,2
	FIAMM12FGL15 0	150	12	10	27,3
	FIAMM12FGL20 5	205	12	10	36,2
	HZB12100	100	12	12	15,25
	HZB12150	150	12	12	21,6
HZB12200	200	12	12	30,5	
LiFePO4	B-LFP-50Ah	50	12	10	34,5
	B-LFP-100Ah	100	12	10	62
	B-LFP-150Ah	150	12	10	96,4
	B-LFP-200Ah	200	12	10	123,9

Таблица Д.3 – Технические и экономические характеристики ДГ

Модель	Установленная мощность, кВт	Напряжение, В	Стоимость единицы, руб.
АД8-Т400	8	230/400	231,413
АД10-Т400	10	230/400	231,686
АД12-Т400	12	230/400	247,88
АД16-Т400	16	230/400	247,884
АД20-Т400	20	230/400	250,705
АД24-Т400	24	230/400	265,447
АД30-Т400	30	230/400	274,274
АД40-Т400	40	230/400	332,878
АД50-Т400	50	230/400	347,347
АД60-Т400	60	230/400	385,385
АД75-Т400	75	230/400	515,97
АД100-Т400	100	230/400	541,45
АД120-Т400	120	230/400	598,234
АД140-Т400	140	230/400	740,649
АД150-Т400	150	230/400	742,378
АД160-Т400	160	230/400	1052,87
АД180-Т400	180	230/400	1064,336
АД200-Т400	200	230/400	1070,069
АД250-Т400	250	230/400	1300,845
АД300-Т400	300	230/400	1378,286
АД320-Т400	320	230/400	1768,585
АД360-Т400	360	230/400	1983,255
АД400-Т400	400	230/400	2083,9
АД500-Т400	500	230/400	2578,758
АД550-Т400	550	230/400	3056,69
АД580-Т400	580	230/400	3217,214
АД640-Т400	640	230/400	3394,937