

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова»

На правах рукописи



Местников Николай Петрович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В
УСЛОВИЯХ СЕВЕРА**

Специальность 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Васильев Павел Филиппович

Якутск – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ПОТЕНЦИАЛА РАЗВИТИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ ..	15
1.1 Обоснование внедрения возобновляемых источников энергии	15
1.2 Потенциал развития гелиоэнергетики	17
1.3 Принцип функционирования объектов гелиоэнергетики	29
1.4 Приоритетные направления развития гелиоэнергетики.....	36
1.5 Перечень внешних факторов, влияющих на функционирование солнечных электростанций.....	43
1.6 Загрязнение окружающей среды Республики Саха (Якутия)	44
1.7 Причины образования поверхностного загрязнения в условиях Республики Саха (Якутия).....	48
Выводы по первой главе.....	51
ГЛАВА 2 ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ ДЕФИЦИТА АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ.....	53
2.1 Постановка задачи	53
2.2 Идентификация влияния внешних факторов на функционирование солнечной электростанции.....	53
2.3 Идентификация влияния внешних факторов на показатели качества электроэнергии от солнечной электростанции	56
2.4 Идентификация базовых параметров объекта исследования.....	60
2.5 Идентификация этапов функционирования объекта исследования.....	63
2.6 Идентификация внешних факторов, влияющих на функционирование фотоэлектрической панели.....	65
2.7 Анализ электротехнических закономерностей функционирования фотоэлектрической панели.....	66

2.8	Анализ теплотехнических закономерностей функционирования фотоэлектрической панели.....	68
2.9	Анализ методов краткосрочного прогнозирования функционирования солнечной электростанции.....	72
2.10	Модель расчета рабочих параметров функционирования инвертора.....	74
2.11	Модель расчета рабочих параметров функционирования объектов трансформации электроэнергии	76
2.12	Модель расчета показателей солнечного излучения и продолжительности светового дня в зависимости от местоположения солнечной электростанции	78
2.13	Модель расчета рабочих параметров функционирования солнечной электростанции.....	81
2.14	Модель расчета параметров технико-экономического обоснования солнечной электростанции.....	84
	Выводы по второй главе	85
	ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА	87
3.1	Постановка задачи	87
3.2	Характер влияния внешних факторов на функционирование солнечной электростанции.....	87
3.3	Условия проведения натурных исследований.....	89
3.4	Исследование характера влияния поверхностного загрязнения на функционирование солнечной электростанции.....	92
3.4.1	Исследование характера влияния мелкодисперсных фракций пыли на функционирование солнечной электростанции.....	92
3.4.2	Исследование характера влияния снегового покрова на функционирование солнечной электростанции.....	101
3.5	Исследование характера влияния подфакторов, снижающих интенсивность солнечного излучения, на функционирование солнечной электростанции	107

3.5.1	Исследование характера влияния задымления окружающей среды на функционирование солнечной электростанции.....	107
3.5.2	Исследование характера влияния облачности на функционирование солнечной электростанции.....	112
3.6	Исследование характера влияния температуры окружающей среды на функционирование солнечной электростанции.....	118
3.7	Исследование комплексного влияния внешних факторов на функционирование солнечной электростанции.....	124
3.8	Математическая модель функционирования солнечной электростанции, учитывающая внешние факторы	125
3.9	Исследование способов повышения энергоэффективности солнечных электростанций.....	130
3.9.1	Способ защиты ФЭП от поверхностного загрязнения	130
3.9.2	Способ эффективного размещения фотоэлектрических панелей	136
3.9.3	Способ повышения выработки двухсторонних фотоэлектрических панелей	144
	Выводы по третьей главе.....	149
	ГЛАВА 4 ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ АВТОНОМНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ..	152
4.1	Постановка задачи	152
4.2	Идентификация базовых параметров объекта оценки надежности автономной энергосистемы	153
4.3	Алгоритм идентификации показателей надежности автономной энергосистемы	155
4.4	Результаты расчетов показателей надежности исследуемой автономной энергосистемы	157
	Выводы по четвертой главе.....	160
	ГЛАВА 5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРЕДЛАГАЕМЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ.....	161
5.1	Постановка задачи	161

5.2	Алгоритм идентификации показателей технико-экономического обоснования модернизации автономной энергосистемы	162
5.3	Алгоритм идентификации эффекта внедрения предлагаемых способов на окружающую среду.....	166
5.4	Результаты расчета показателей технико-экономического обоснования предлагаемых технических решений при модернизации автономной энергосистемы	167
5.5	Анализ среднесуточных графиков выработки электроэнергии от автономной энергосистемы	170
	Выводы по пятой главе.....	173
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	174
	СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	177
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	179
	ПРИЛОЖЕНИЕ «А» АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ НАУЧНЫХ И ПРАКТИЧЕСКИХ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ	211
	ПРИЛОЖЕНИЕ «Б» РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ	215
	ПРИЛОЖЕНИЕ «В» РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ Т–КРИТЕРИЯ СТЬЮДЕНТА	218

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования.

Электроснабжение потребителей в изолированных энергосистемах Северо-Востока России производится посредством эксплуатации дизель-генераторных, газопоршневых и газотурбинных установок и мини-ТЭЦ, что требует наличия бесперебойного топливоснабжения. Доля электроснабжения традиционных источников энергии на территории Северо-Востока России составляет до 98% от суммарной выработки электроэнергии, где стоимость горюче-смазочных материалов повышается до 250% со сроком доставки до 2,5 лет в условиях короткого периода речной навигации в устьях рек Лена, Оленек, Яна, Индигирка и Колыма, который составляет не более двух месяцев в год. На фоне высокой стоимости горюче-смазочных материалов удельная стоимость выработки электроэнергии составляет от 40 рублей и более за 1 кВт·ч. Из-за высокой степени изношенности основного фонда генерирующих и сетевых элементов, функционирующих на указанных территориях, автономных энергосистем возникает большое количество отказов отдельных элементов системы, по причине которого возрастает время ремонтно-восстановительных и профилактических работ.

Внедрение солнечных электростанций (далее – солнечные ЭС) в автономные энергосистемы Севера позволит увеличить надежность объектов генерации, уменьшить потребление горюче-смазочных материалов и объемы выбросов вредных веществ в окружающую среду.

Эксплуатация солнечных ЭС имеет некоторую сложность по причине негативного влияния внешней среды Севера на их рабочие характеристики и режимы работы. Под внешней средой подразумеваются следующие факторы: ограниченная продолжительность солнечного сияния в осенне-зимний период; поверхностное загрязнение, вызванное образованием слоя мелкодисперсных фракций пыли или снегового покрова с образованием наледи на поверхности

фотоэлектрических панелей при больших суточных разнице температур воздуха; облачность; задымление среды, вызванное сезонными лесными пожарами.

В связи с этим задачи по проведению исследований и идентификации режимов работы солнечных ЭС в климатических условиях Севера, разработка на их основе новых способов защиты фотоэлектрических панелей (далее – ФЭП), направленных на уменьшение негативного влияния вышеуказанных факторов, а также разработка методики расчета рабочих параметров, учитывающей внешние факторы и климат северных территорий, как дополнение к существующим методикам, имеют высокую актуальность и востребованность.

Разработку мер по вышеуказанному направлению необходимо выполнить в соответствии с основными положениями и целевыми показателями, утвержденными в Федеральном законе «Об электроэнергетике» от 26.03.2003 №35-ФЗ, Энергетической Стратегии РФ на период до 2035 года, Доктрине энергетической безопасности РФ, Национальных проектах РФ на период до 2024 года и Схеме и программе развития электроэнергетики Республики Саха (Якутия) на 2021–2025 гг.

Целевые показатели эффективности регламентируются следующими конкретными показателями:

- Снижение рисков энергетической безопасности России, связанных с внутренними вызовами и угрозами из-за увеличения транспортных расходов, капитальных затрат и введения отраслевых санкций со стороны недружественных стран [141, 175–177].

- Соблюдение нормативно-правовых и нормативно-технических требований к объектам гелиоэнергетики в соответствии с действующими нормативно-правовыми актами России в области энергосбережения микрогенерации [134, 174, 180, 181].

Степень разработанности темы исследования.

Проблема снижения энергоэффективности солнечных электростанций создает значительные сложности в развитии автономных энергосистем Севера. Анализ научных исследований отечественных и зарубежных ученых в области

гелиоэнергетики Ж.И. Алферова, Б.В. Лукутина, В.З. Манусова, С.В. Митрофанова, А.В. Винникова, О.А. Суржикова, Е.Б. Шандарова, О.С. Попеля, Г.Г. Райкунова, В.В. Мельникова, Г.П. Охоткина, Д.С. Стребкова, С.К. Позняка, М.Ж. Сулейманова, Ю.Г. Коломиец, Р.Ж. Ерсайн (Казахстан), Р. Махалакшми (Индия), С. Семе (Словения), М. Вахид (Малайзия), С. Хоссейни (США), Ш. Аднан (Пакистан), Ш. Хайдер (Пакистан) и др. определил, что увеличение энергоэффективности солнечных электростанций имеет значительную роль в развитии комбинированных систем электроснабжения. Рассматриваемая проблема достаточно многогранна, и задачи повышения энергоэффективности солнечных электростанций в условиях Севера являются в настоящее время актуальными, но в достаточной степени нерешенными. Существующие способы повышения энергоэффективности объектов солнечной энергетики имеют высокую стоимость и сложные технологические циклы функционирования.

Таким образом, изучение особенностей функционирования солнечных электростанций на территории Севера с учетом разработки новых способов повышения их энергоэффективности и надежности автономной энергосистемы имеет высокую актуальность для выполнения фундаментальных и прикладных исследований.

Объект исследования – солнечные электростанции в составе автономных энергосистем на территории Северо-Востока России.

Предмет исследования – процессы воздействия внешних факторов Севера на показатели режимов работы, надежности энергосистемы и технико-экономической эффективности солнечных электростанций в составе автономных энергосистем. Способы повышения энергоэффективности солнечных электростанций.

Цель диссертации – повышение энергоэффективности и точности результатов оценки технико-экономических параметров функционирования солнечных электростанций в условиях Северо-Востока России, как элемента автономных энергосистем.

Задачи для достижения цели диссертационной работы:

1. Провести анализ современного состояния развития технологии выработки электрической энергии от солнечных электростанций, функционирующих в составе автономных энергосистем, в условиях холодного климата и идентифицировать показатели влияния внешних факторов на режимы работы солнечных электростанций.

2. Обосновать и разработать методику расчета рабочих параметров солнечных электростанций, учитывающую внешние факторы и повышающую достоверность результатов с фактическими показателями функционирующих объектов, как дополнение к существующим методикам.

3. Разработать способы повышения энергоэффективности солнечных электростанций как элемента автономных энергосистем, направленных на уменьшение негативного влияния внешних факторов Севера.

4. Провести оценку показателей надежности автономной энергосистемы, имеющей в составе солнечную электростанцию с применением разработанных способов.

5. Выполнить технико-экономическую и экологическую оценки применения разработанных способов повышения энергоэффективности в солнечной электростанции, функционирующей в автономной энергосистеме Севера.

Методы исследований.

В процессе выполнения исследований применялись: научно-техническое обобщение литературных источников по исходным предпосылкам исследований; методы теоретических основ электротехники; методы математической статистики; методы обработки экспериментальных данных натурных исследований; метод аналитических исследований. Натурные исследования выполнялись комплексным методом с применением солнечной ЭС, двухосевой трекерной установки с ФЭП, мобильной климатической станции, электронного микроскопа, программного обеспечения, климатической камеры и вспомогательных, измерительных и регистрирующих оборудования.

Таким образом, изучение особенностей функционирования солнечных ЭС на территории Севера с учетом разработки новых способов повышения их энергоэффективности и надежности функционирования имеет высокую актуальность для выполнения фундаментально-прикладных исследований.

Научная новизна:

1. Предложены дополняющие коэффициенты к существующей методике оценки энергетического потенциала солнечных электростанций, увеличивающие точность расчета годовой выработки электроэнергии.

2. Предложена математическая модель оценки энергетического потенциала солнечных электростанций, учитывающая внешние факторы Северо-Востока России.

3. Предложена реализация способа защиты фотоэлектрических панелей солнечных электростанций от поверхностного загрязнения на основе воскового жидкого покрытия, способствующего уменьшению периодичности очистки панелей.

4. Впервые предложен новый способ дугообразного размещения фотоэлектрических панелей солнечных электростанций, учитывающий траекторию движения Солнца, и позволяющий увеличить выработку электрической энергии.

Положения, выносимые на защиту:

1. Дополняющие коэффициенты к существующей методике оценки энергетического потенциала солнечных электростанций, увеличивающие точность расчета годовой выработки электроэнергии.

2. Математическая модель оценки энергетического потенциала и расчета технико-экономических показателей солнечной электростанции, учитывающая внешние факторы Севера.

3. Предложенный способ защиты фотоэлектрических панелей солнечных электростанций, способствующий замедлению интенсивности образования поверхностного загрязнения на панелях.

4. Предложенный способ дугообразного размещения фотоэлектрических панелей солнечных электростанций, увеличивающий выработку электрической энергии на 10...15%.

Степень достоверности результатов проведенных исследований.

Достоверность полученных результатов обеспечена: выполнением натурных исследований, учитывающих ключевые требования теории планирования экспериментальных исследований и климатические условия; получением патента на изобретение [39], свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ [154–155]; применением математической модели, имеющей свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ [154]; подтверждением принятых условий совпадения результатов имитационных расчетов с показателями функционирования существующих солнечных ЭС Севера в пределах $\pm 4...5\%$.

Выполнена оценка технико-экономических параметров и вычислены показатели надежности солнечной электростанции в составе автономной энергосистемы на территории Севера.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что полученные результаты могут быть применены в гелиоэнергетике на территории Севера и разработке способов повышения энергоэффективности и надежности солнечных электростанций.

Практическая значимость работы заключается во внедрении на отраслевом уровне научных положений и рекомендаций диссертации, обеспечивающих качественное функционирование солнечных ЭС в составе автономных энергосистем в удаленных и труднодоступных территориях Севера.

Реализация работы определяется следующими результатами:

1. Разработаны способы повышения энергоэффективности, методика расчета рабочих параметров и математическая модель оценки энергетического потенциала и технико-экономических показателей функционирования солнечных электростанций, учитывающих внешние факторы Севера.

2. Материалы диссертационной работы отражены в отчете НИР в рамках выполнения государственного задания по проекту FWRS-2021-0013

«Исследования путей повышения эксплуатационной надежности и эффективности интеллектуальных электроэнергетических систем в условиях Севера и Арктики» №121032200059-7 по приоритетному направлению ПФНИ в РФ 2.5.1 Энергетика и рациональное природопользование.

3. Получены акты внедрения в производственный процесс Министерства жилищно-коммунального хозяйства и энергетики Республики Саха (Якутия), ГАУ РС(Я) «Центр развития ЖКХ и повышения энергоэффективности» и ООО «ЯкутскЭкоСети».

4. Материалы диссертационной работы применены в учебной дисциплине «Общая энергетика» СВФУ и выполнении хоздоговорной работы по разработке технико-экономического обоснования строительства солнечной ЭС в Нерюнгринском ГОК и стратегии развития ООО «ЯкутскЭкоСети» с видением до 2032 г.

Отличие от других работ состоит в разработке новых положений, подтвержденных патентом на изобретение [39] и свидетельствами о государственной регистрации программы для ЭВМ [154–155].

Апробация работы. Основные материалы диссертации докладывались и обсуждались на конференциях: Евразийский Симпозиум по проблемам прочности и ресурса в условиях низких климатических температур «EURASTRENCOLD», г. Якутск, сентябрь 2020–2023 гг.; Всероссийский конкурс Фонда содействия инновациям «Студенческий Стартап (3-я очередь)», г. Москва, май 2023 г.; International Russian Automation Conference (RusAutoCon), г. Сочи, сентябрь 2021–2023 гг.; International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), г. Магнитогорск, сентябрь 2021–2022 гг.; International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), г. Сочи, июнь 2020–2022 гг.; Всероссийский конкурс Фонда содействия инновациям «У.М.Н.И.К», г. Якутск, декабрь 2020 г.; Всероссийский молодежный конкурс «Россия. Экология. Энергосбережение», г. Москва, февраль 2019 г.

Публикации. По материалам исследования и полученным результатам опубликовано 22 работы, в том числе: 8 работ в рецензируемых журналах из

перечня рекомендованных ВАК РФ; 3 работы в журналах, индексируемых в международной базе данных Scopus; 2 монографии, индексируемые в базе данных РИНЦ; 1 патент на изобретение [39]; 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ [154–155]; 6 работ в материалах всероссийских и международных конференций [82, 83, 86, 88, 89, 101].

В работах, опубликованных в соавторстве, личный вклад автора составляет не менее 60%.

Личный вклад автора заключается в самостоятельном проведении теоретического анализа, натурных исследований, обработке и оценке полученных данных, в разработке способов повышения энергоэффективности солнечных электростанций и методики оценки энергетического потенциала объектов гелиоэнергетики.

Все результаты, представленные в диссертации, получены автором самостоятельно или при непосредственном участии, доля которой составляет не менее 60%. Представление изложенных в диссертации и выносимых на защиту результатов, полученных в совместных исследованиях, согласовано с соавторами.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы: п. 1 – «Разработка научных основ (подходов) исследования общих свойств и принципов функционирования и методов расчета, алгоритмов и программ выбора и оптимизации параметров, показателей качества и режимов работы энергетических систем, комплексов, энергетических установок на органическом и альтернативных топливах и возобновляемых видах энергии в целом и их основного и вспомогательного оборудования»; п. 6 – «Теоретический анализ, экспериментальные исследования, физическое и математическое моделирование, проектирование энергоустановок, электростанций и энергетических комплексов, функционирующих на основе преобразования возобновляемых видов энергии (энергии водных потоков, солнечной энергии, энергии ветра, энергии биомассы, энергии тепла земли и других видов возобновляемой энергии) с целью

исследования и оптимизации их параметров, режимов работы, экономии ископаемых видов топлива и решения проблем экологического и социально-экономического характера».

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений, списка литературы из 225 наименований и трех приложений на 16 страницах. Материал диссертации изложен на 226 страницах машинописного текста и включает 117 рисунков и 32 таблицы.

ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ПОТЕНЦИАЛА РАЗВИТИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ СЕВЕРО-ВОСТОКА РОССИИ

1.1 Обоснование внедрения возобновляемых источников энергии

В соответствии с реализацией целей устойчивого развития N13 ООН, пунктами Парижского климатического соглашения и Стратегии Европейского Союза в области климата и энергетики до 2030 года [22, 80], запланировано достижение углеродной нейтральности и нулевых углеродных выбросов посредством реализации крупных проектов в области возобновляемых источников энергии (далее – ВИЭ). В начале 2022 года стоимость природного газа повысилась в 4...5 раз и нефтепродуктов в 1,5 раза на фоне сложной геополитической обстановки. Данное положение создало отрицательную тенденцию в энергетических системах стран, которые приобретают углеводородное сырье [185]. Наличие значительного количества субсидируемых объектов ВИЭ не оправдало ожидания потребителей по причине бесконтрольного повышения тарифов на электроэнергию [187]. Таким образом, разработка новых мер и способов, направленных на повышение выработки электроэнергии от объектов ВИЭ, является первоочередной задачей энергетических компаний и стран, в значительной степени зависящих от поставок углеводородного сырья.

Роль ВИЭ в энергосистемах различных стран динамично возрастает. Данный тренд обосновывается исчерпаемостью углеводородных видов топлива (нефть, газ, уголь) и необходимостью поэтапной декарбонизации энергетических систем и комплексов. К примеру, на текущем уровне добычи разведанных запасов нефтегазового топлива в России хватит менее чем на 30 лет [166].

Заинтересованность в применении энергии солнечного излучения, напора воды и движения воздушных потоков возрастает. В 2014 году на территории Китая введено в эксплуатацию около 35 ГВт установленной мощности от гидро-, ветро- и солнечных ЭС, что позволило сократить потребление угольного топлива на 20%

при эквиваленте на 2016 год. Также в Китае введена в эксплуатацию гелио-тепловая электростанция мощностью 10 МВт, являющаяся по данному типу третьей по счету в мире [75,77].

Необходимость введения изменений в выработке электроэнергии диктуется логикой международного сотрудничества, стремлением улучшить экологическую обстановку, развитием инновационных технологий, а также необходимостью повышения экологической эффективности объектов электроэнергетики, что значительно влияет на тренды экономического развития государств (Рисунок 1.1).

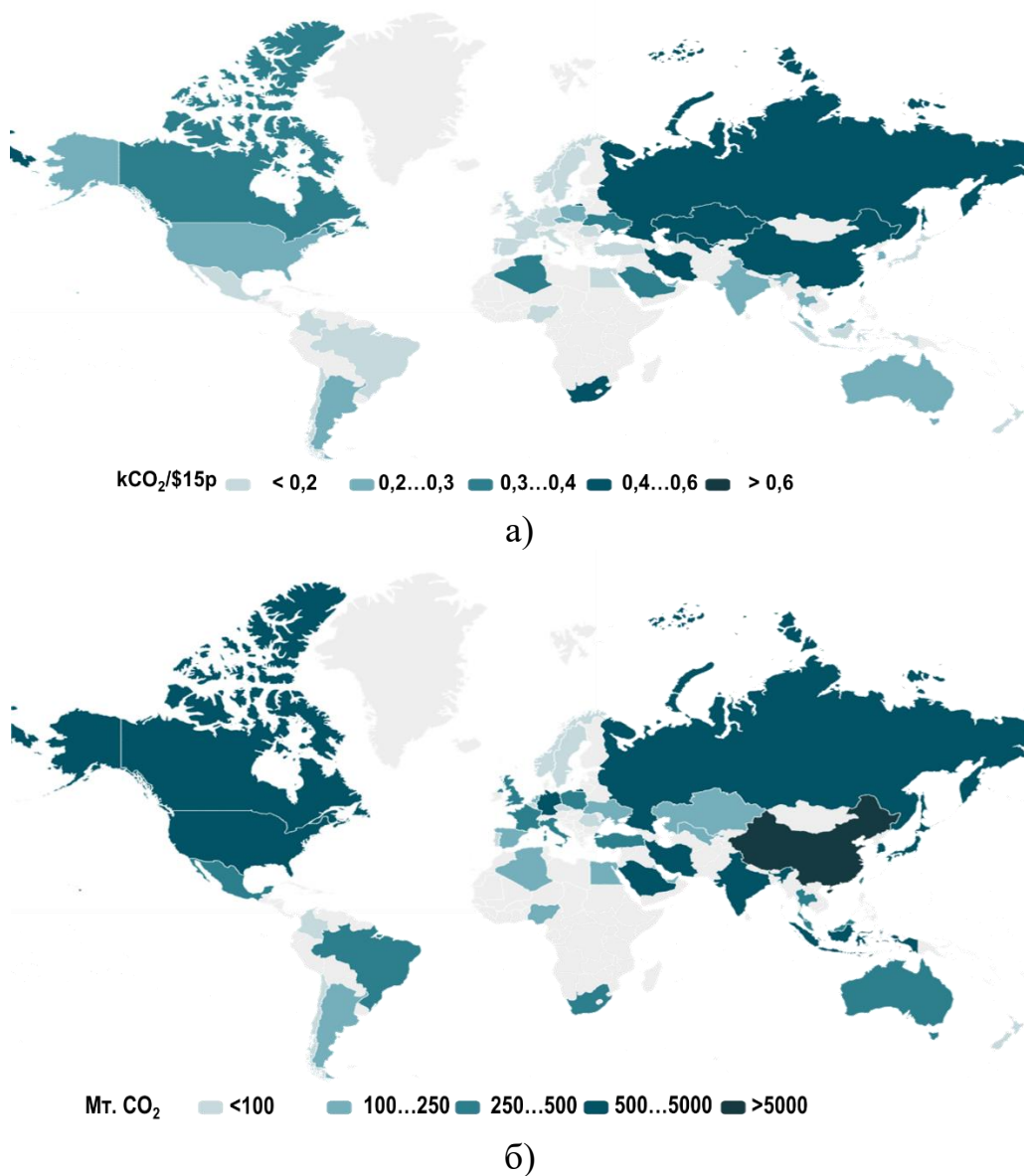


Рисунок 1.1 – Карты мировых выбросов CO₂:

- а) интенсивность выбросов CO₂ при паритете покупательной способности [47]; б) интенсивность выбросов CO₂ от сжигания топлива [23]

Ключевыми лидерами по интенсивности выбросов CO_2 при паритете покупательной способности ($\text{kCO}_2/15\text{p\$}$) являются следующие страны: Кувейт – 0,61; Иран – 0,525; Россия – 0,47; Узбекистан – 0,46; Казахстан – 0,451; Тайвань – 0,416; Китай – 0,409; ЮАР – 0,402; Саудовская Аравия – 0,324; Канада – 0,317. В данных государствах, как правило, активно развивается добыча углеводородного сырья [47].

Ключевыми лидерами по интенсивности выбросов CO_2 от сжигания топлива в атмосферу (MtCO_2) являются: Китай – 10398; США – 4632; Индия – 2251; Россия – 1795; Япония – 1014; Германия – 62; Иран – 621; Южная Корея – 614; Канада – 546; Индонезия – 537 [23]. Тенденция значительного роста объема выбросов CO_2 в атмосферу имеется не только в странах с низким технологическим развитием, но и в странах с высоким уровнем экономического развития (США, Канада, Германия и др.), где также добывается углеводородное сырье.

1.2 Потенциал развития гелиоэнергетики

Мировой уровень

Гелиоэнергетика является одним из важнейших направлений развития ВИЭ и практически в равной степени конкурирует с ветро- и гидроэнергетикой. Гелиоэнергетика интенсивно развивается, как правило, в странах Юго-Восточной Азии, Европейского Союза, Ближнего Востока, Северной Америки и др.

В ходе анализа карты распределения годовой энергии солнечного излучения (Рисунок 1.2) установлено, что значительная часть солнечной инсоляции приходится на экваториальную (Африка, центральная Америка, Аравийский полуостров) и субэкваториальную (Юго-Восточная Азия, Австралия, Южная Америка и др.) часть Земли, где суммарная годовая радиация составляет 2000...2500 $\text{kВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$. На территории Сибири и Дальнего Востока наблюдается высокая солнечная радиация до 1500 $\text{kВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ в год, как и на территории северной части Европы и Америки [207].

Кроме распределения энергии солнечной инсоляции рассмотрена карта продолжительности солнечного сияния (Рисунок 1.3). Наибольшая продолжительность солнечного сияния зафиксирована на экваториальной части Земли – до 4000 часов в год. На территориях с тропическим климатом данный показатель составляет до 2400 часов в год, как и на территории Северо-Восточной и Южной части России, Казахстана, Венгрии, Франции, Канады, Африки, Южной Америки и Китая.

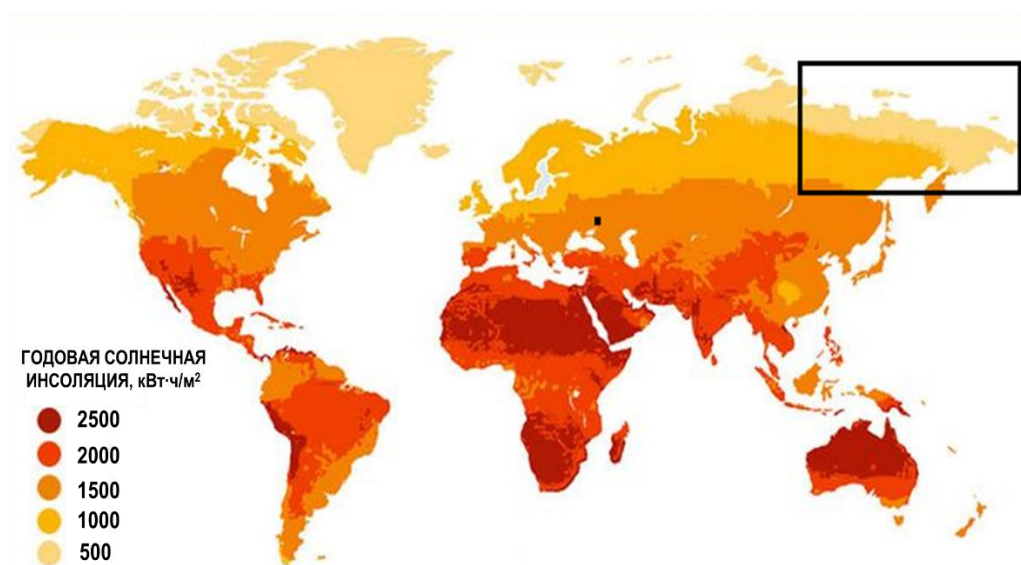


Рисунок 1.2 – Мировая карта продолжительности солнечного сияния

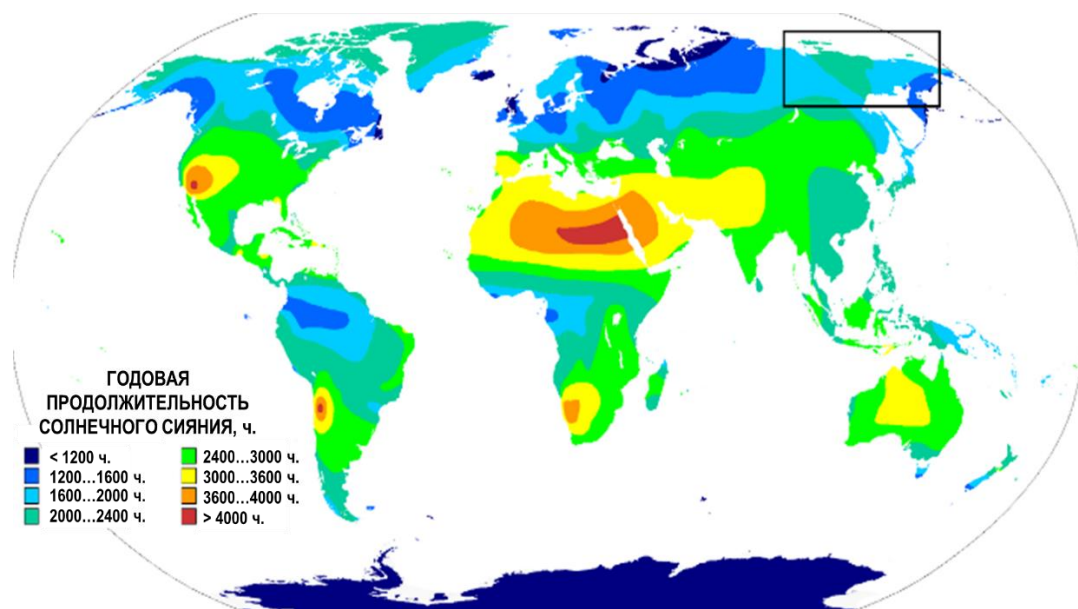


Рисунок 1.3 – Мировая карта солнечной инсоляции [199]

На картах видно, что ветровые и солнечные ЭС размещены на территории следующих стран (Рисунок 1.4) с указанием их суммарной доли выработки

электроэнергии: Испания – 32,7%; Португалия – 31,0%; Германия – 28,9%; Великобритания – 25,2%; Новая Зеландия – 24,8%; Нидерланды – 32,7%; Чили – 21,1%; Австралия – 19,7%; Италия – 18,3%; Бельгия – 17,6%; Швеция – 17,2%; Турция – 17,0% [32]. Суммарная доля выработки ветровых и солнечных ЭС на мировом уровне составляет 10,2%, из которых 6,6% – это ветровые ЭС и 3,6% – солнечные ЭС.

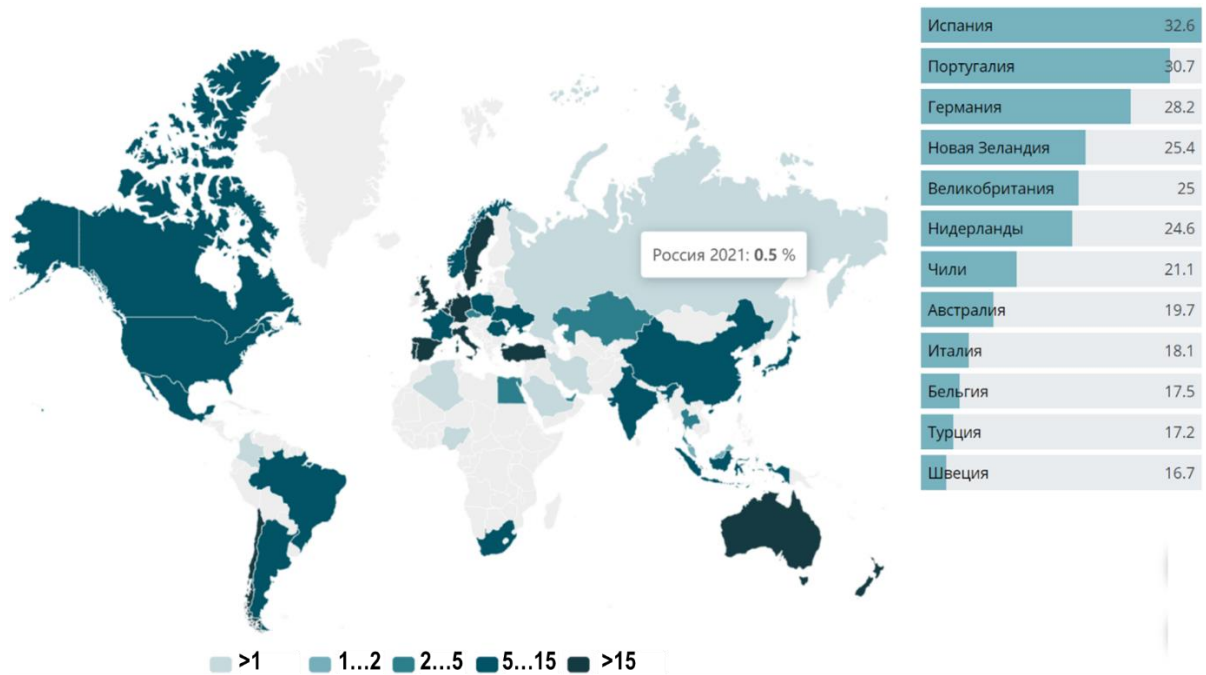


Рисунок 1.4 – Карта долей применения ветро- и солнечных электростанций [32]

Внедрение объектов гелиоэнергетики производится в тех областях, где преобладают показатели энергии солнечной инсоляции и продолжительности солнечного сияния. Наличие физико-энергетических показателей возможности применения объектов гелиоэнергетики не является единственным ключевым параметром оценки строительства солнечных ЭС, так как необходим учет наличия источников финансирования. Суммарные капитальные затраты на 1 кВт установленной мощности солнечной ЭС составляют около 2500 \$.

Зафиксирована значительная тенденция роста количества ветровых и солнечных ЭС в странах Юго-Восточной Азии, Тихого Океана, Африки (Рисунок 1.5); стабильный рост – в странах Северной Америки, Европы и Южной Америки (Рисунок 1.4). На рисунке 1.6 представлена мировая карта размещения различных

видов ЭС, функционирующих на основе традиционных и нетрадиционных (возобновляемых) источников энергии [198]. Значительная часть солнечных ЭС размещена вдоль субэкваториального и экваториального пояса Земли: Северная Америка, Центральная Америка, южная часть Европы, Индия и Юго-Восточная Азия.

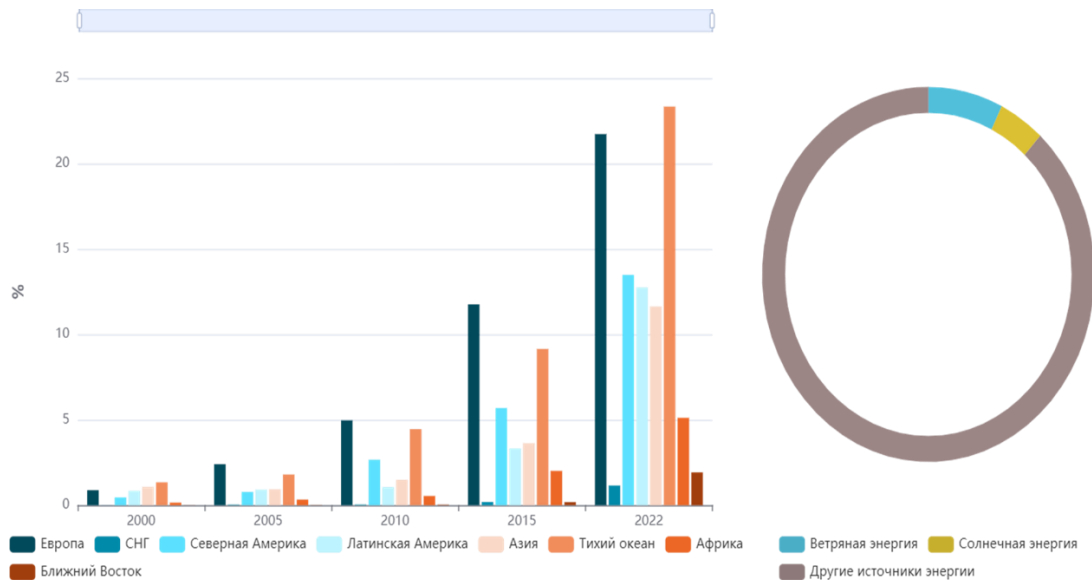


Рисунок 1.5 – Тенденция развития ветровых и солнечных электростанций [32]

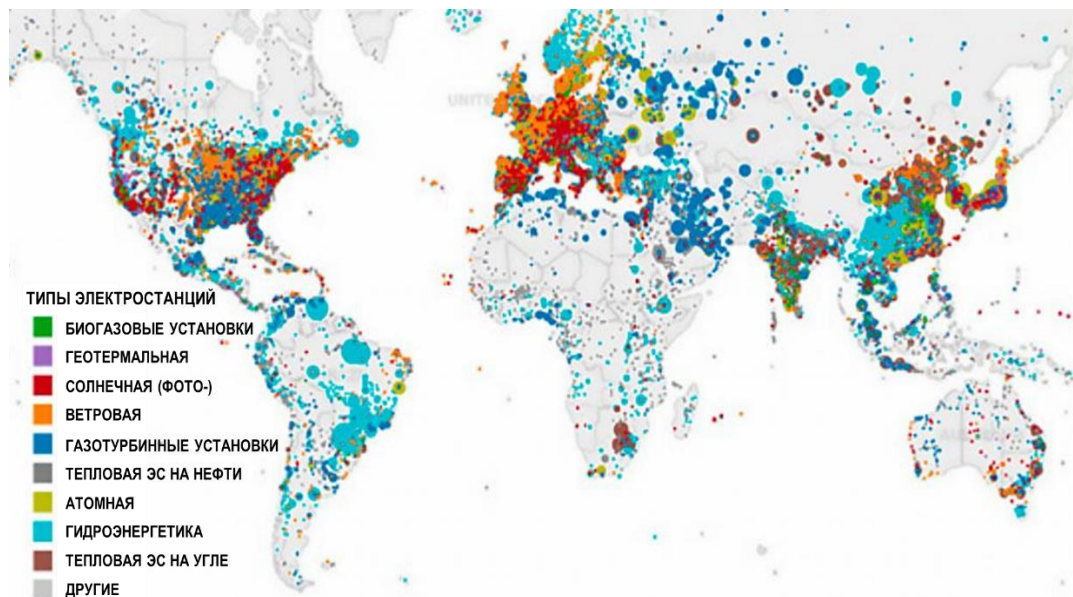


Рисунок 1.6 – Карта размещения различных типов электростанций

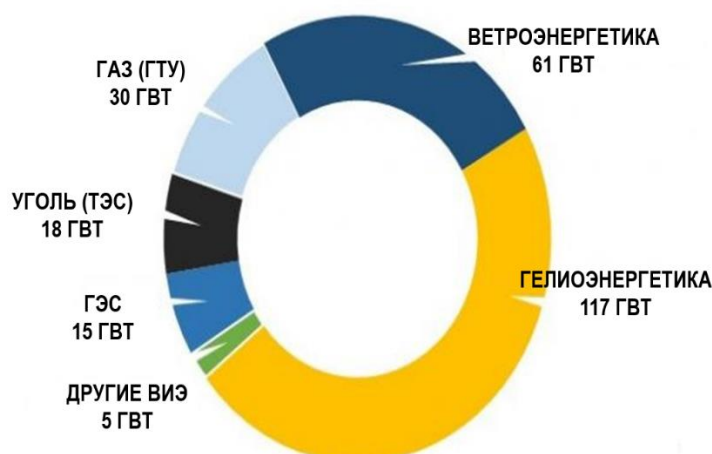
Агентством Европейской ассоциации «Solar Power Europe» выпущен прогноз развития гелиоэнергетики с видением до 2024 года, где на рисунке 1.7а представлен график мировой тенденции роста суммарной установленной мощности солнечных

ЭС с указанием различных сценариев развития. На период 2016–2019 гг. зафиксирована некоторая стагнация по росту установленной мощности солнечных ЭС. С поэтапным уменьшением себестоимости технологий гелиоэнергетики прогнозируется ежегодный рост количества солнечных ЭС на 9...12%. По состоянию на 2020 год прирост выработки электроэнергии в мире, представленный на рисунке 1.7б, составил около 246 ГВт, из которых 117 ГВт – на гелиоэнергетику,



а)

МИРОВОЙ ПРИРОСТ МОЩНОСТЕЙ В
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ В 2020 ГОДУ (ГВт)



б)

Рисунок 1.7 – Оценка мирового развития гелиоэнергетики [138]:

а) график тенденции роста гелиоэнергетики; б) диаграмма доли гелиоэнергетики в мировой электроэнергетике

Прогноз структуры выработки электрической энергии в странах Европейского Союза (далее – ЕС) до 2030 года установил, что рост выработки

солнечных ЭС будет находиться практически на одном уровне с гидро– и атомной энергетикой, тенденции которых представлены на рисунке 1.8 [136]. Выработка электроэнергии от объектов гелиоэнергетики будет возрастать до 2030 года путем ввода новых солнечных ЭС различных линеек мощностей.

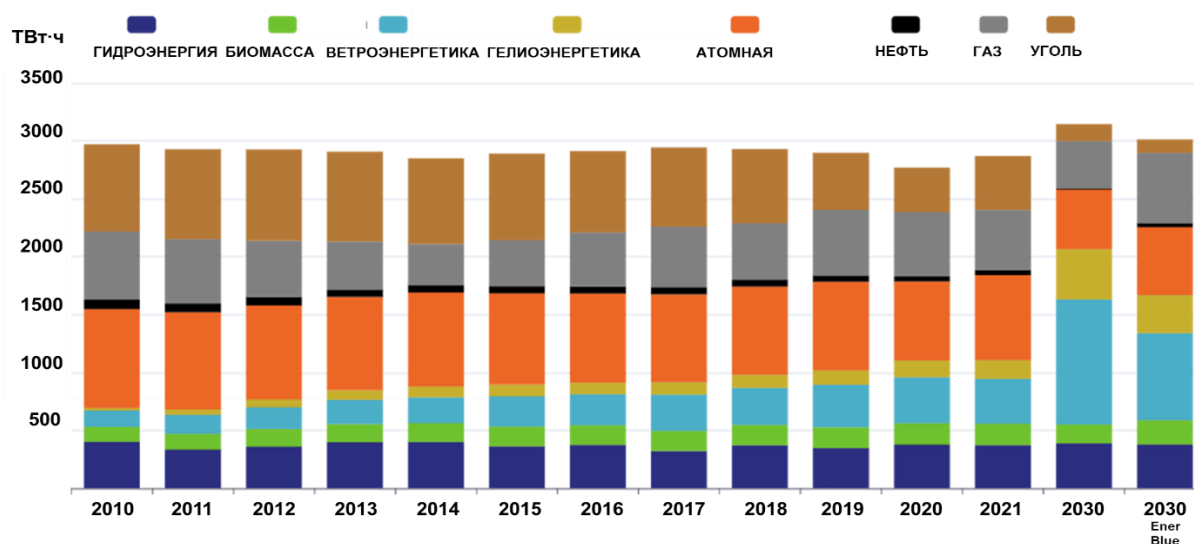


Рисунок 1.8 – Прогноз структуры выработки в Европе до 2030 года

Российский уровень

Гелиоэнергетика в России является одной из основных направлений развития российской энергетики. Отечественные солнечные ЭС в основном эксплуатируются в автономных энергосистемах. Первая в России солнечная ЭС введена на территории Белгородской области с установленной мощностью 100 кВт. На период 2010–2023 гг. проекты в области гелиоэнергетики реализованы на территории Республики Саха (Якутия) (далее – РС(Я)) с последующим вводом в эксплуатацию солнечных ЭС в п. Ючугей (20 кВт), с. Кубергене (20 кВт), с. Бетенкес (40 кВт), п. Батагай (1 МВт), с. Хонуу (2 МВт) и др. [95]. На рисунке 1.9 представлены диаграммы с долями выработки гелиоэнергетики в ЕЭС России по состоянию на 01.01.2023 г.

В соответствии с Энергетической стратегией России [140] планируется увеличение показателей использования ВИЭ на 17% к 2035 году для устойчивого функционирования технологически изолированных территориальных электроэнергетических систем (далее – ТИТЭС) Северо-Востока России с последующим уменьшением себестоимости производства электроэнергии [60, 76].

Развитие отечественных солнечных ЭС будет направлено для эксплуатации в ТИТЭС Северо-Востока России (Рисунок 1.10), где не действуют требования политики оптового рынка электроэнергии и мощности (далее – ОРЭМ) [219].

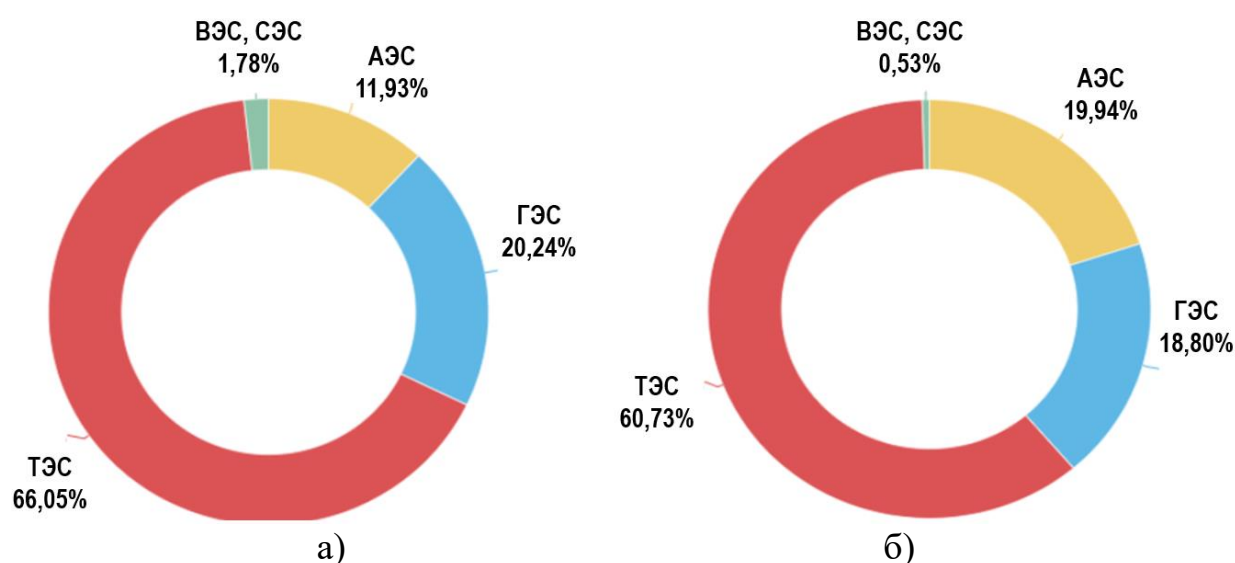


Рисунок 1.9 – Структура электроэнергетики в ЕЭС России на 01.01.2023:

а) структура установленной мощности ЕЭС России;

б) структура выработки электроэнергии по типам электростанций

Доля установленной мощности ветровых и солнечных ЭС в ЕЭС России составила 1,78% и выработки электроэнергии – 0,53%, что является малым показателем на фоне интенсивного развития ВИЭ в мире.

По состоянию на 01.01.2023 г. солнечными ЭС на территории России выработано более 2253,8 млн. кВт·ч электроэнергии [33]. По результатам конкурсных отборов ПАО «Русгидро» в области реализации проектов по возобновляемой энергетике к реализации выбраны проекты солнечных ЭС суммарной установленной мощностью – 1858,3 МВт с последующим вводом в 2015–2025 годах [143]. К примеру, в 2015 году введены в эксплуатацию 4 ед. солнечных ЭС суммарной установленной мощностью 40,2 МВт, в 2016 году – 5 ед. солнечных ЭС до 30 МВт, в 2017 году – 30 солнечных ЭС до 356,9 МВт, в 2018г. – 14 солнечных ЭС до 285 МВт, в 2019 году (по состоянию на 14 сентября) – 17 солнечных ЭС до 257,5 МВт [144] и т.д. Прогнозируемый энергетический потенциал российской гелиоэнергетики составляет более 2300 млрд. т.у.т, где

экономически эффективная часть – 12,5 млн. т.у.т. На рисунках 1.11, 1.12 представлены карты энергопотенциала солнечной энергетики в России.



Рисунок. 1.10 – Карта энергосистем в России

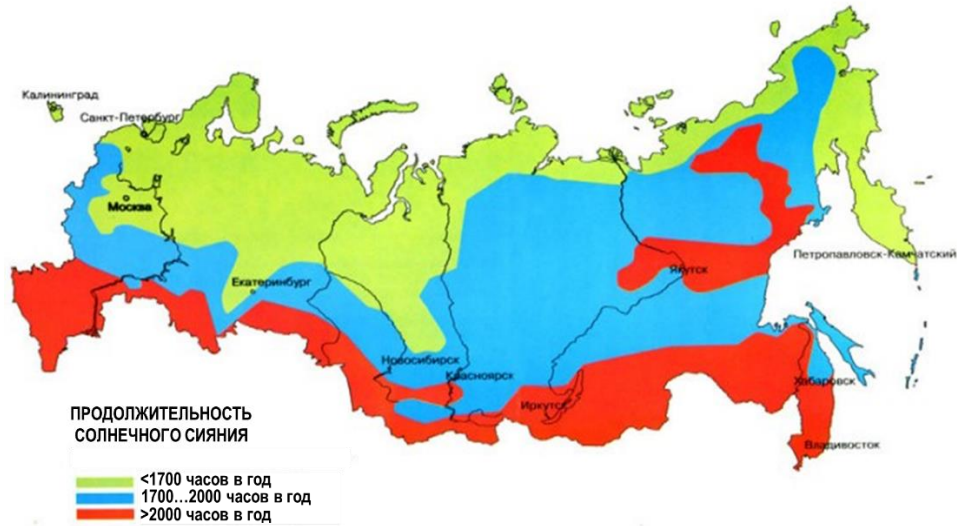


Рисунок 1.11 – Карта продолжительности солнечного сияния



Рисунок 1.12 – Карта солнечной инсоляции в России

Практическая реализация проектов в области гелиоэнергетики на территории России имеет перспективу развития при наличии следующих условий: продолжительность солнечного сияния – 1700...2000 час/год; среднесуточная горизонтальная солнечная инсоляция – не менее 3,0 кВт·ч/м². Данные показатели имеются в Северо-Восточных, Дальневосточных, Южных, Сибирских регионах России [87, 96, 97].

Региональный уровень

Электроснабжение удаленных и стационарных потребителей на территории Севера производится посредством применения в автономных энергосистемах, в том числе с интеграцией ветровых и солнечных ЭС. С 2000-х годов на территории Республики Саха (Якутия) (далее – РС(Я)) начато внедрение солнечных ЭС, где в качестве первого объекта введена солнечная ЭС установленной мощностью 60 кВт в центральной части РС(Я), параллельно функционирующей в интеграции с дизельной электростанцией (далее – ДЭС). В ходе эксплуатации солнечной ЭС в РС(Я) зафиксировано влияние климатических особенностей Севера в течение всего года. Данными особенностями являются [184]: повышенная интенсивность солнечной радиации (февраль...август); повышенная величина Альбеда ($K_{отр} \approx 0,82$) вследствие коэффициента отражения от снегового покрова (февраль...август); явление «белых ночей», где Солнце не заходит за горизонт (май...июль); значительное количество дней с безоблачной погодой; поверхностное загрязнение фотоэлектрических панелей (далее – ФЭП) по причине образования слоя пыли, снегового покрова или обледенения.

В рамках оценки энергетического потенциала объектов гелиоэнергетики на территории Севера в Институте физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН разработана сводная карта радиационно-климатического районирования территории РС(Я) для оценки возможности применения объектов гелиоэнергетики (Рисунок 1.13) с выделением четырех районов. В энергетическом отношении на 1 м² горизонтальной поверхности на северные регионы России за год поступает порядка 550...830 кВт·ч энергии солнечного излучения, на большей

части Сибири – 830...1100 кВт·ч и в южной части Дальнего Востока – 1100...1380кВт·ч. [45–46].

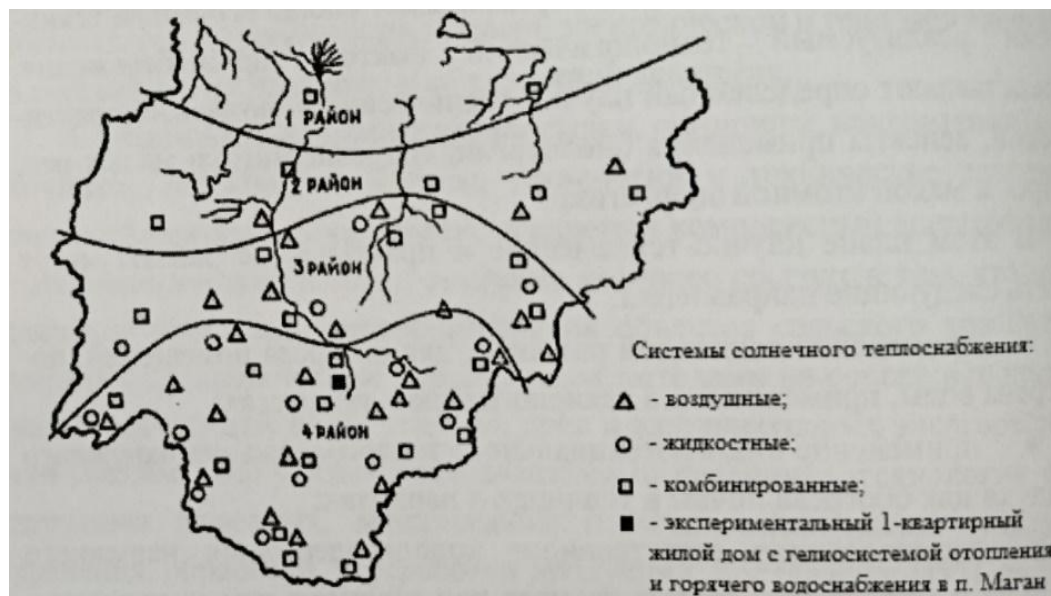


Рисунок 1.13 – Сводная карта радиационно-климатического районирования территории Республики Саха (Якутия)

Из карты видно, что на третьем районе рекомендуется умеренное применение объектов гелиоэнергетики. В данном районе продолжительность солнечного сияния – 1600...2000 час/год. Приемлемые условия для применения гелиоэнергетики имеются в четвертом районе, где интенсивность солнечной инсоляции составляет более 4200 МДж/м² с продолжительностью излучения до 2300 час/год. Количество пасмурных дней – минимально [6].

Район – 1: применение технологий гелиоэнергетики для практических целей крайне ограничено, а годовая продолжительность солнечного излучения – 1300...1700 часов. В течение летнего периода технологий гелиоэнергетики можно использовать только для подогрева технической воды.

Район – 2: продолжительность солнечного излучения – 1500...1800 час/год. Рекомендуется применение технологий гелиоэнергетики для выработки электрической (солнечные ЭС) и тепловой энергии (солнечные коллекторы).

Район – 3: данный район относится к зоне умеренного применения солнечных ЭС и солнечных коллекторов (далее – СК), так как продолжительность солнечного излучения составила не более 2000 час/год.

Район – 4: данный район наиболее благоприятен для применения солнечных ЭС и СК, т.к. годовая солнечная инсоляция – более 4200 МДж/м² с продолжительностью излучения – 2300 час/год [57–59].

Районы 3–4 имеют соответствующие условия для эксплуатации солнечных ЭС и СК. Данная карта является ориентиром для оценки внедрения солнечных ЭС и СК на территории РС(Я).

Значительная территория РС(Я) находится в зоне ТИТЭС, где эксплуатируются многочисленные автономные энергосистемы. Ключевая доля выработки электроэнергии в автономных энергосистемах производится в ДЭС. Эксплуатируются малые гидроэлектростанции, ветровые и солнечные ЭС [158, 170, 182].

В автономных энергосистемах практически не действуют правила и требования ОРЭМ по причине наличия системы перекрестного субсидирования [35, 55, 78, 115]. В таблице 1.1 представлены показатели ключевых энергетических объектов РС(Я). На территории Якутии функционируют четыре энергорайона (Таблица 1.1 и Рисунок 1.14):

1. Центральный энергетический район находится в балансе ПАО «Якутскэнерго». Наличие централизованной энергосистемы. Суммарная установленная мощность объектов – 468,1 МВт при максимальной зимней нагрузке – 323 МВт. Класс напряжения объектов передачи электроэнергии (ЛЭП) – 0,4...220кВ [186].

2. Западный энергетический район находится в балансе ПАО «Якутскэнерго». Наличие централизованной энергосистемы. Суммарная установленная мощность объектов генерации электроэнергии – 1127 МВт при максимальной зимней нагрузке – 599 МВт. Класс напряжения объектов передачи электроэнергии (ЛЭП) – 0,4...220 кВ. Район подключен к ЕЭС России [36, 56].

3. Южный энергетический район находится в балансе АО «ДГК». Наличие централизованной энергосистемы. Суммарная установленная мощность объектов генерации электроэнергии – 618 МВт при максимальной нагрузке – 279 МВт. Класс

напряжения объектов передачи электроэнергии (ЛЭП) – 0,4...220 кВ. Район подключен к ЕЭС России [36].

4. Северный энергетический район находится в балансе АО «Сахаэнерго». Наличие многочисленных систем автономных энергосистем. Суммарная установленная мощность объектов генерации электроэнергии – 218,8 МВт. Класс напряжения объектов передачи электроэнергии (ЛЭП) – 0,4...35 кВ (110 кВ от Колымской ГЭС). Район крайне сложен в эксплуатации объектов энергетики по причине необходимости постоянного снабжения топливом на фоне слаборазвитой транспортной инфраструктуры [143]. Данный район затрагивает значительную территорию РС(Я) площадью до 2,4 млн. км² [71, 190, 192, 193].

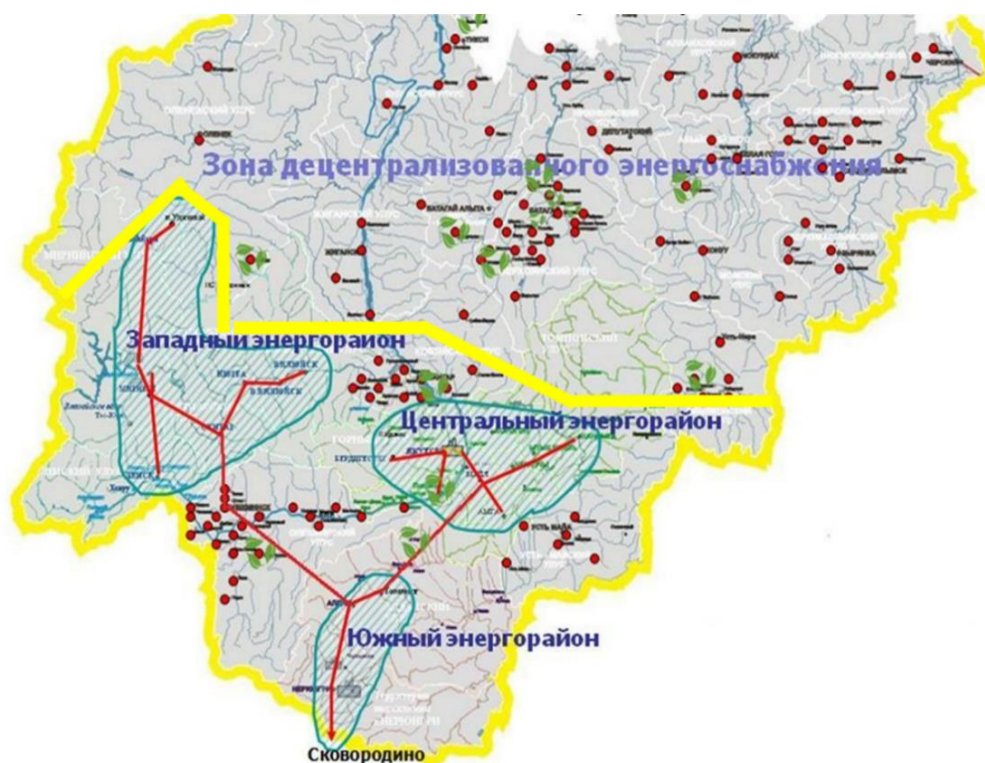


Рисунок 1.14 – Карта энергосистемы Республики Саха (Якутия)

Таблица 1.1 – Параметры ключевых объектов энергетики в Якутии

№	Объект	Энергорайон	Установленная мощность, МВт	Тепловая мощность, Гкал/час
1.	Якутская ГРЭС–1	Центральный	170,09	661,00
2.	Якутская ГРЭС–2	Центральный	193,48	469,00
3.	Якутская ТЭЦ	Центральный	12,00	497,00
4.	Нерюнгринская ГРЭС	Южный	570,00	820,00
5.	Каскады Вилюйской ГЭС	Западный	680,00	0,00
6.	Мирнинская ГРЭС	Западный	72,00	39,30

Вышеуказанные объекты энергетики функционируют посредством сжигания углеводородного топлива. К примеру, северному энергорайону ежегодно требуется: 64311,19 тонн дизельного топлива; 4289,15 тонн нефти; 25516 тонн бурого угля [54]. В данном энергорайоне функционируют [46]: 146 ДЭС; 24 солнечных ЭС; две ветровых ЭС. Суммарная установленная мощность объектов энергорайона – от 218 МВт [48, 112]. В связи со значительными объемами потребления дорогостоящего топлива в Программе инновационного развития ПАО «Русгидро» на территории северного энергорайона РС(Я) до 2030 года дополнительно запланирован ввод новых 60 ветровых и солнечных ЭС в целях уменьшения объемов потребления горюче-смазочных материалов (далее – ГСМ) [172, 174].

1.3 Принцип функционирования объектов гелиоэнергетики

Солнечная энергетика – это одно из ключевых направлений развития ВИЭ. Сущность данного направления заключается в преобразовании энергии солнечного излучения в электрическую или тепловую энергию. Выработка электроэнергии производится от ФЭП, являющейся одним из главных элементов солнечной ЭС (Рисунок 1.15а) [11, 98]. Выработка тепловой энергии производится с помощью СК (Рисунок 1.15б). Данный элемент применяется в системах горячего водоснабжения и теплоснабжения помещений [132, 196].

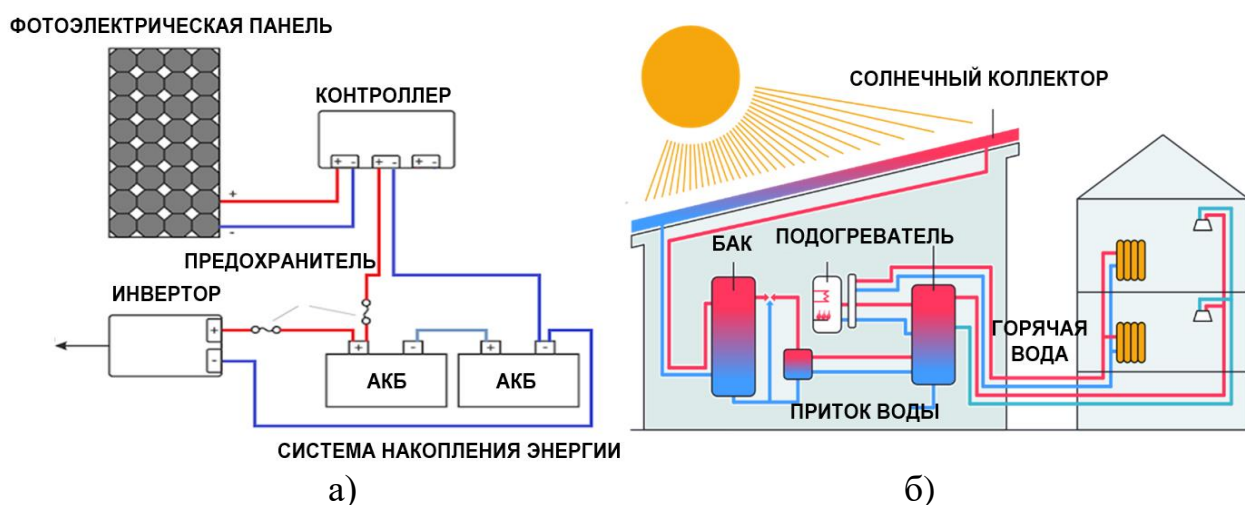


Рисунок 1.15 – Схемы объектов гелиоэнергетики:

а) солнечная электростанция; б) солнечный коллектор

Выработка электроэнергии от ФЭП происходит вследствие влияния инфракрасного излучения от Солнца. На рисунке 1.16 представлено спектральное распределение энергии солнечного излучения, где рассматривается «наземное» применение ФЭП [25, 26], так как только видимая часть спектра генерирует электроэнергию. Инфракрасное излучение влияет на выработку электроэнергии от ФЭП и ее поверхностную температуру.

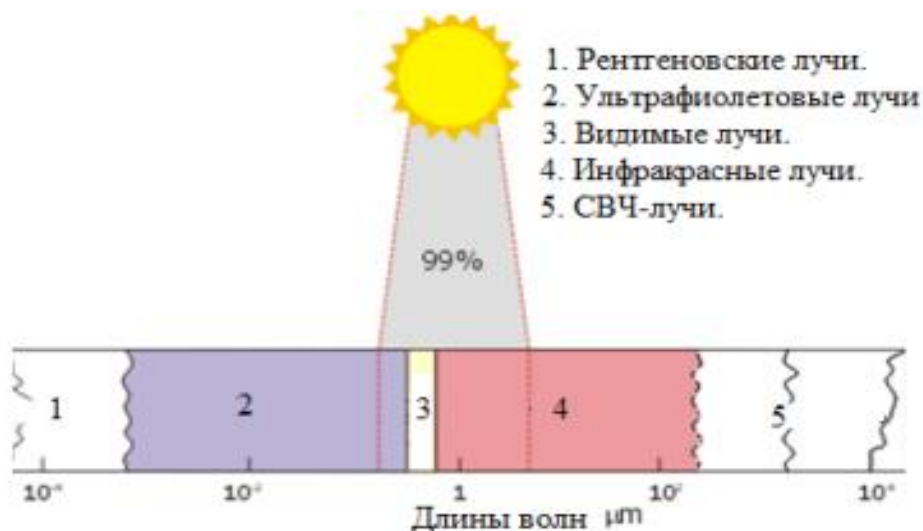


Рисунок 1.16 – Спектральное распределение солнечного излучения

Солнечное излучение имеет собственный пик пропускания в видимом диапазоне длин волн – 0,38...0,78 микрометра ($\mu\text{м}$) электромагнитного спектра. Солнце испускает значительное количество энергии в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра [105, 116, 188].

Устойчивое функционирование ФЭП в значительной мере зависит от внешних условий. Закономерности и граничные условия выработки электроэнергии от ФЭП в зависимости от определенного перечня внешних факторов представлены в Главе 2.

Солнечной инсоляцией называется суммарное количество энергии от Солнца на горизонтальную поверхность Земли, которое и характеризует мощность солнечного излучения. Единица изменения инсоляции [$\text{Вт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$]. Величину инсоляции необходимо учесть для расчета выработки электроэнергии от ФЭП. Солнечное излучение, направленное на поверхность Земли, имеет следующие виды: прямая радиация; рассеянная радиация; отраженная радиация (Рисунок 1.17).

Выработка электроэнергии от ФЭП зависит также от внутреннего состава самой панели. Коэффициент полезного действия (далее – КПД) ФЭП варьируется в зависимости от вида и качества применяемых материалов. По данной причине ФЭП имеет несколько видов. Главный материал ФЭП – это кремний, который при специальной обработке становится полупроводниковым материалом. Данный факт является наиболее важным физическим свойством ФЭП для выработки электроэнергии. Существуют семь основных видов ФЭП (Рисунок 1.18 и Таблица 1.2), подразделяющихся по технологии и материалу изготовления [83, 92, 101]:

- Монокристаллическая ФЭП. КПД \approx 20...22%. Высокая эффективность по выработке электроэнергии, но высокая капитальная стоимость.
- Поликристаллическая ФЭП. КПД \approx 14...18%. Средняя эффективность по выработке электроэнергии и низкая капитальная стоимость.
- Аморфная (гибкая) ФЭП. КПД \approx 9...11%. Низкая эффективность по выработке электроэнергии, но малая капитальная стоимость.
- Теллурид кадмия (CdTe). КПД \approx 16,4%.
- Диселенид индия и меди (CIS). КПД \approx 15%.
- Перовскитные. КПД \approx 26...33%. Значительная эффективность выработки электроэнергии, но быстрая потеря стабильности структуры в условиях крайне высоких температур окружающей среды.
- Многослойные. КПД \approx 34,2...39,2%. Значительная эффективность выработки электроэнергии, но имеют высокую себестоимость и мало где применяются.



Рисунок 1.17 – Составляющие солнечного излучения



Рисунок 1.18 – Внешние виды фотоэлектрических панелей

Таблица 1.2 – Преимущества и недостатки видов фотоэлектрических панелей

Виды ФЭП	Преимущества	Недостатки
Монокристаллический	Высокий КПД (до 22%), высокая выработка электроэнергии, период эксплуатации – от 25 лет, высокая эффективность выработки электроэнергии в условиях малой освещенности	Высокая стоимость
Поликристаллический	Малозатратное производство, малая подверженность к влиянию высоких температур воздуха	Низкий КПД, низкая плотность выработки электроэнергии
Тонкопленочные	Возможность скрытой установки, малая стоимость, гибкость и малая толщина, низкая зависимость от затемненности среды, малое количество дефектов.	Низкая плотность выработки электроэнергии

Структура ФЭП напоминает совокупность значительного количества отдельных фотоэлектрических элементов в качестве фото-ячеек. Фотоэлектрические элементы в зависимости от выходных параметров тока и напряжения соединяются в параллельном и последовательном формате в зависимости от паспортной мощности панели. На выходные электроэнергетические параметры ФЭП влияют следующие внешние факторы (условия): солнечное излучение, $[Вт \cdot ч/м^2]$; поверхностная температура ФЭП, $[^{\circ}C]$; поверхностное загрязнение (пыль и снег) ФЭП, уменьшающее ее генерирующую мощность. Напряжение на выходе ФЭП прямо пропорционально ее поверхностной температуре, а ток – интенсивности солнечного излучения. Температурный

коэффициент ФЭП учитывает разницу между температурой окружающей среды и ее поверхности. Данный коэффициент вычисляется в $[\text{mA}/^\circ\text{C}]$.

Фотоэлектрическая ячейка – это главная составляющая ФЭП (Рисунок 1.19). Данная ячейка имеет минимальные геометрические размеры и вырабатывает около 1...2 Вт. В целях увеличения выработки электроэнергии фотоэлектрические ячейки соединяются в фотоэлектрические модули. Данные модули могут быть параллельно соединены с другими модулями идентичной мощности, образуя ФЭП. Последовательное соединение ячеек и модулей необходимо для увеличения выходного напряжения, а параллельное – для увеличения выходного тока [109, 121, 123, 125]. На рисунке 1.20 представлена вольтамперная характеристика ФЭП с основными электроэнергетическими параметрами.

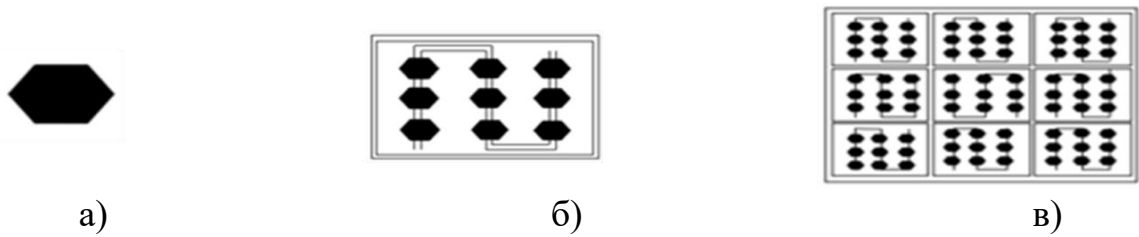


Рисунок 1.19 – Составляющие и элементы фотоэлектрической панели:

а) ячейка; б) модуль; в) панель

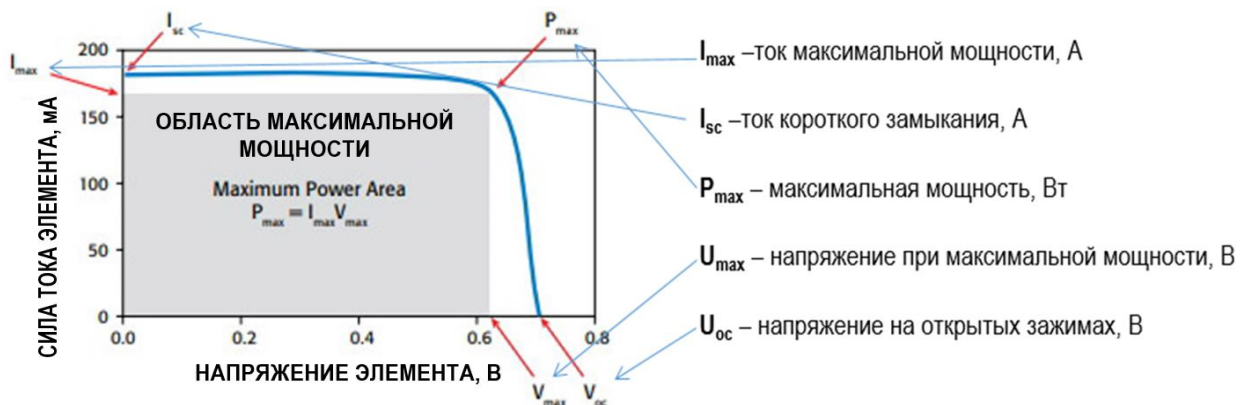


Рисунок 1.20 – Вольтамперная характеристика фотоэлектрической панели

Модель функционирования ФЭП строится на основе классической эквивалентной схемы замещения со сосредоточенными параметрами, включающей в себя генератор фототока, диод, шунтирующее сопротивление (R_{sh}), последовательное (R_s) сопротивление [26]. В целях получения удовлетворительной

точности модели необходимо иметь исходные значения внутренних сопротивлений фотоэлементов.

Ранее было определено, что электроснабжение удаленных и стационарных потребителей Севера производится посредством эксплуатации автономных энергосистем, где могут быть интегрированы солнечные ЭС. Солнечная ЭС – это совокупность оборудования, состоящая из одного или нескольких ФЭП и комплектующих (аккумуляторов, преобразователей, контроллеров и прочих). Они предназначены для получения электроэнергии путем преобразования энергии солнечного излучения [11].

Существуют три типа солнечных ЭС: «Автономная» применяется в автономных энергосистемах для электроснабжения удаленных и стационарных потребителей (Рисунок 1.21а); «Сетевая» применяется в централизованных энергосистемах (Рисунок 1.21б); «Гибридная» применяется в централизованных и автономных энергосистемах (Рисунок 1.21в).

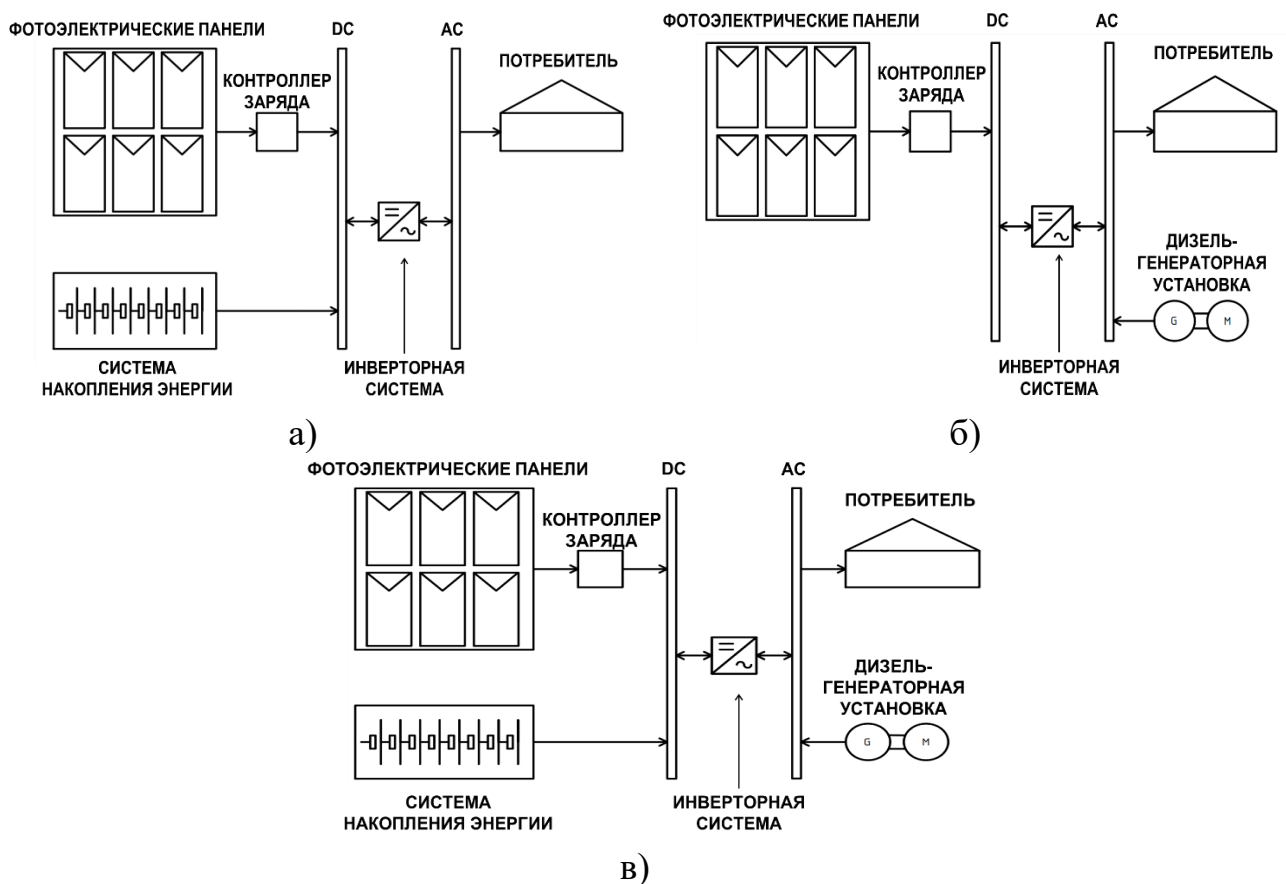


Рисунок 1.21 – Структурные схемы видов солнечных электростанций:

а) автономная; б) сетевая; в) гибридная

В автономных энергосистемах применяются автономные и гибридные солнечные ЭС по причине наличия системы накопления энергии (далее – СНЭ), представленные в виде секций аккумуляторных батарей (далее – АКБ). Автономные солнечные ЭС имеют возможность электропитания потребителей не только в дневной, но и в ночной период вследствие наличия возможности электропитания от СНЭ.

Функционирование гибридной солнечной ЭС имеет аналогичный технологический цикл, как у автономной, но существует возможность дополнительного питания СНЭ от внешних источников питания, алгоритм работы которой представлен на рисунке 1.22а.

Функционирование автономной солнечной ЭС имеет следующий технологический цикл:

- ФЭП преобразовывает энергию солнечного излучения в электроэнергию.
- Сгенерированная электроэнергия направляется через контроллер заряда в систему накопления энергии.
- Накопленная электроэнергия направляется к конечному потребителю через силовой инвертор, где производится преобразование тока из постоянного в переменный с учетом изменения напряжения в пределах 198...242 В.

Применение сетевых солнечных ЭС рекомендуется в централизованных энергосистемах в целях сглаживания потребления в период дневных пиковых нагрузок в крупных населенных пунктах, городах и мегаполисах.

Себестоимость сетевых солнечных ЭС на порядок ниже, чем у автономных и гибридных солнечных ЭС по причине отсутствия необходимости применения СНЭ, алгоритм работы которой представлен на рисунке 1.22б. [52, 64, 70, 79, 124].

В таблице 1.3 представлен обзорный анализ преимуществ и недостатков автономных/гибридных и сетевых солнечных ЭС. По результатам проведенного анализа установлено, что в случае наличия значительных финансовых ресурсов для строительства солнечной ЭС рекомендуется применение системы накопления энергии по причине возможности питания потребителя в течение ночного периода, где отсутствует источник солнечного излучения.

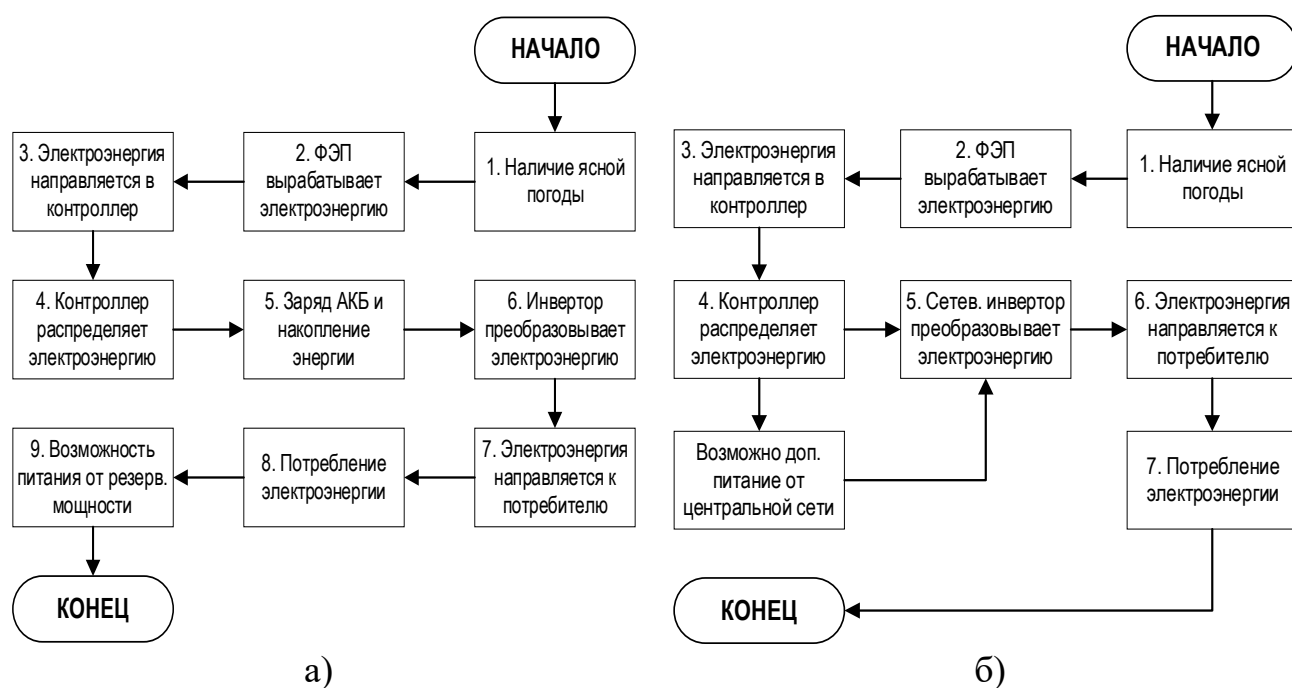


Рисунок 1.22 – Блок-схема алгоритма работы солнечных электростанций:

а) гибридная; б) сетевая

Таблица 1.3 – Преимущества и недостатки типов солнечных электростанций

Вид	Преимущества	Недостатки
Сетевая	Малые затраты; отсутствие СНЭ; простота в монтаже и эксплуатации; работа по «зеленому тарифу»	Останов при пасмурной погоде; отсутствие выработки в ночной период; высокие требования к контроллеру и инвертору; высокие требования к защитной автоматике; зависимость от влияния внешних факторов
Автономная/ Гибридная	Питание потребителя в пасмурной погоде; независимость от внешнего питания; простота монтажа; возможность подключения внешних источников питания к системе	Высокие кап. затраты; необходимость применения СНЭ; периодическая замена АКБ в СНЭ.

В связи с этим, учитывая существующие преимущества и недостатки солнечных ЭС, на изолированных и отдаленных территориях Севера рекомендуется эксплуатация автономных или гибридных солнечных ЭС.

1.4 Приоритетные направления развития гелиоэнергетики

Существующие исследования в области гелиоэнергетики можно сгруппировать следующим образом: направление 1 – разработка способов

повышения энергоэффективности солнечных ЭС; направление 2 – разработка математических моделей для проведения имитационных расчетов рабочих режимов и оценки энергетического потенциала солнечных ЭС; направление 3 – разработка систем электроснабжения потребителей на основе гибридизации с ВИЭ.

Направление – 1

Наиболее применяемыми технологиями повышения энергоэффективности солнечных ЭС являются: системы автоматизированного слежения за источником солнечного излучения для ФЭП в виде трекерных установок [25, 34, 151, 165]; двухсторонние (бифациальные) ФЭП; методы и способы защиты и очистки поверхности ФЭП от поверхностного загрязнения; др.

Системы автоматизированного слежения за источником солнечного излучения для ФЭП (трекерная установка) применяются для увеличения выработки электроэнергии от солнечной ЭС вне зависимости от местоположения источника солнечного излучения. Данные системы подразделены на несколько видов (Рисунок 1.23).

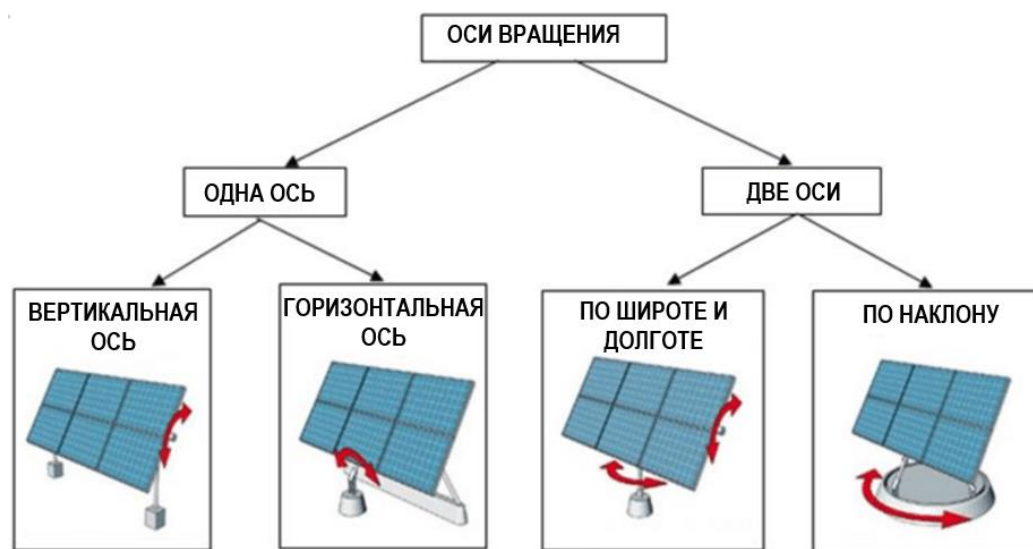


Рисунок 1.23 – Виды трекерных установок

Установка представляет собой несущую конструкцию, на которую крепятся ФЭП. Трекерная установка приводится в движение для достижения перпендикулярного положения между ФЭП и излучением от Солнца. Электропитание установки выполняется от ФЭП или АКБ. Возможна установка роутера и веб-бокса для передачи данных о выработке электроэнергии в

диспетчерское управление. Вследствие применения трекерных установок выработка электроэнергии от ФЭП увеличивается на 40...58% при сравнении с линейным (классическим) размещением ФЭП [64, 103, 133, 152, 172].

В источниках [62, 63, 120, 142, 216] описан порядок проведения исследований, где изучена возможность применения двухсторонних ФЭП. Вследствие применения двухсторонних ФЭП их выработка электроэнергии увеличивается на 28...40% за счет генерации от тыльной части ФЭП. Применение двухсторонних ФЭП значительно увеличивает выработку электроэнергии в солнечных ЭС. На рисунке 1.24 представлен внешний вид двухсторонних ФЭП.

Устойчивая выработка электроэнергии от ФЭП зависит не только от величины солнечной радиации, но и от наличия поверхностного загрязнения, вызванного мелкодисперсными фракциями пыли или снеговым покровом. В целях уменьшения негативного влияния данного фактора применяются следующие системы очистки поверхности ФЭП (Рисунок 1.25): ручная очистка; механизированная очистка; автоматизированная очистка; электромагнитная очистка; автоматизированная водная очистка; химическая очистка.



а)



б)

Рисунок 1.24 – Внешний вид двухсторонней фотоэлектрической панели:

а) внешний вид; б) размещение панелей

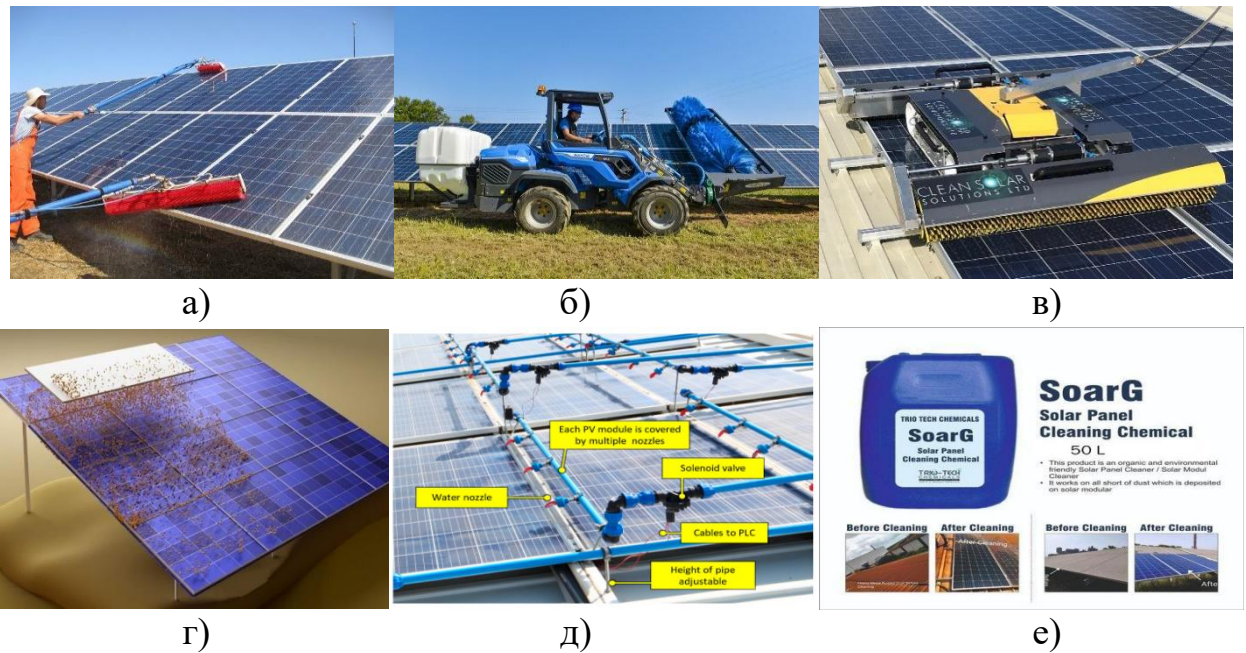


Рисунок 1.25 – Способы очистки и профилактики фотоэлектрических панелей:
 а) ручная; б) механизированная; в) автоматизированная; г) электромагнитная; д)
 автоматизированная водная; е) химическая

Существующие системы очистки и профилактики поверхности ФЭП от поверхностного загрязнения имеют свои преимущества и недостатки. Ручной способ очистки имеет высокие трудозатраты. Механизированный способ очистки требует наличия специализированной техники с высокими эксплуатационными затратами. Роботизированные, автоматизированные, электромагнитные, водные и химические способы очистки ФЭП имеют значительные капитальные и эксплуатационные расходы, а также требуется сервисное обслуживание [1, 2, 7, 8, 10, 19, 37, 94, 107, 161, 164]. Таким образом, разработка и исследование новых способов защиты/очистки ФЭП от негативного влияния поверхностного загрязнения имеет высокую актуальность и востребованность.

Направление – 2

На сегодняшний день применяются различные программные комплексы (далее – ПК), предназначенные для моделирования и проведения имитационных расчетов рабочих режимов солнечных ЭС, а именно: Homer Energy; RET Screen; Global Solar Atlas; TRNSYS; др. В данных ПК при оценке энергетического потенциала и режимов работы солнечных ЭС применяются закономерности,

учитывающие, к примеру, облачность только с тремя выборками погоды – пасмурно, малая облачность, дымка. Несмотря на данный факт, существуют десять видов облачности с различными показателями пропускной способности солнечного излучения [29, 109–111, 221, 224, 225].

Исследования в области имитационного моделирования и разработки математических моделей для объектов гелиоэнергетики направлены на изучение возможности применения ПК для проведения расчетов годовой выработки электроэнергии. Однако среднестатистическое отклонение расчетов с применением вышеуказанных ПК составляет 15...22%. В данных ПК при выполнении расчетов режимов работы солнечной ЭС практически не учитываются внешние факторы окружающей среды – задымление воздушной среды, облачность и поверхностное загрязнение. Данный факт значительно уменьшает достоверность и точность выполняемых расчетов.

В связи с этим обновление существующей методики расчета рабочих характеристик и режимов работы солнечных ЭС, учитывающей внешние факторы для получения научно обоснованного, достоверного и точного анализа, является актуальной задачей.

Направление – 3

Автономные энергосистемы, функционирующие на основе традиционных и возобновляемых источников энергии, разрабатываются в соответствии с требованиями к их энергоэффективности. Требуется уменьшение габаритных и весовых параметров в целях упрощения процедур строительства и эксплуатации.

К примеру, существует гибридная автономная контейнерная ЭС (Рисунок 1.26), представляющая собой совокупность ФЭП, ветровой энергетической установки, СНЭ, инверторной системы и распределительный щит управления, отличающаяся тем, что данная ЭС разработана в мобильном исполнении и снабжена резервной ДГУ [128]. Гибридная ЭС предназначена для электроснабжения стационарных потребителей, размещенных на удаленных и изолированных территориях.

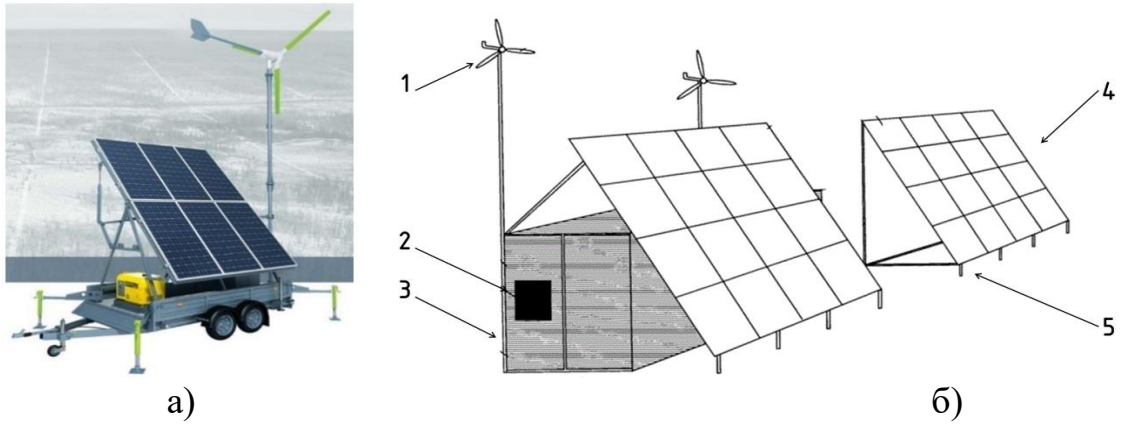


Рисунок 1.26 – Внешний вид идентичных гибридных электростанций:

а) мобильная гибридная ЭС; б) модульная гибридная ЭС

где 1 – ветровая энергетическая установка; 2 – шкаф управления; 3 – модуль для размещения силового оборудования; 4 – фотоэлектрическая панель; 5 – несущая конструкция для панелей.

Существует практический пример внедрения солнечной ЭС установленной мощностью 60 кВт в состав автономной энергосистемы в с. Батамай (центральная Якутия), принципиальные схемы которых представлены на рисунках 1.27, 1.28.

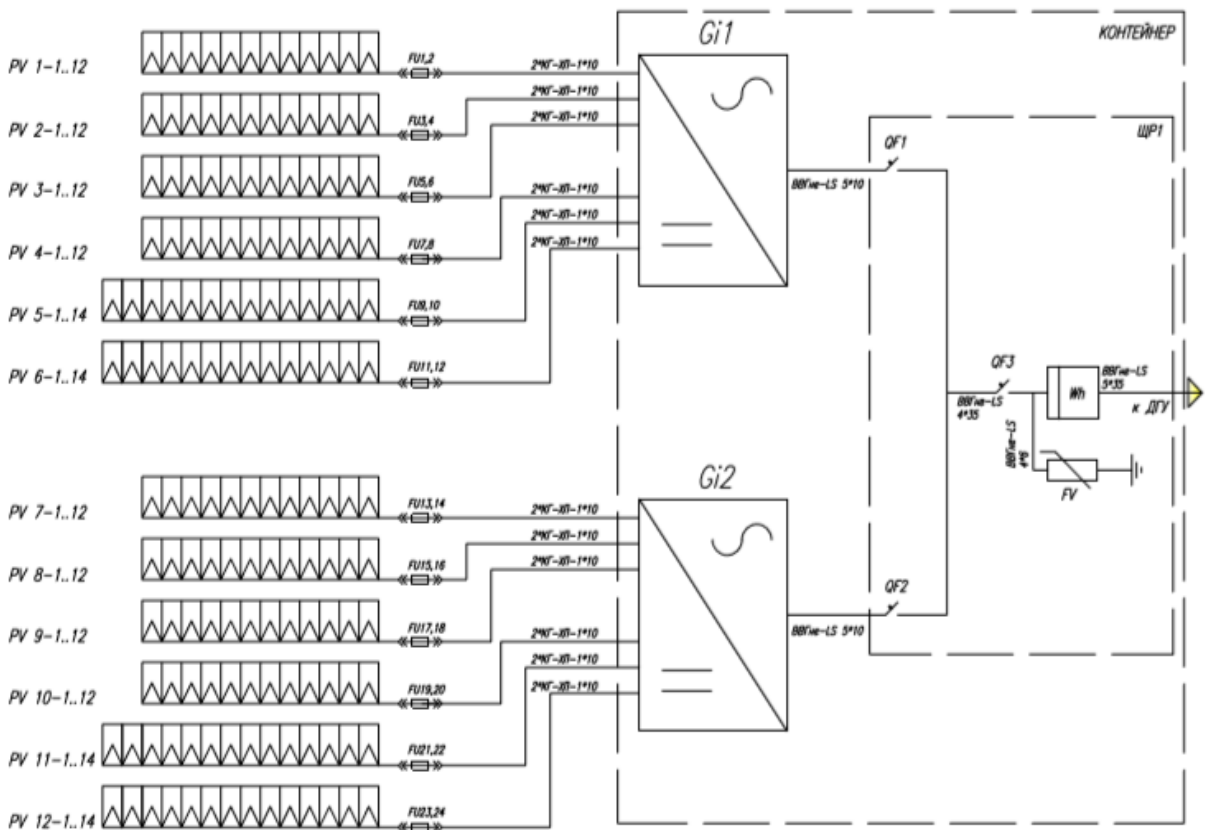


Рисунок 1.27 – Схема солнечной электростанции в с. Батамай

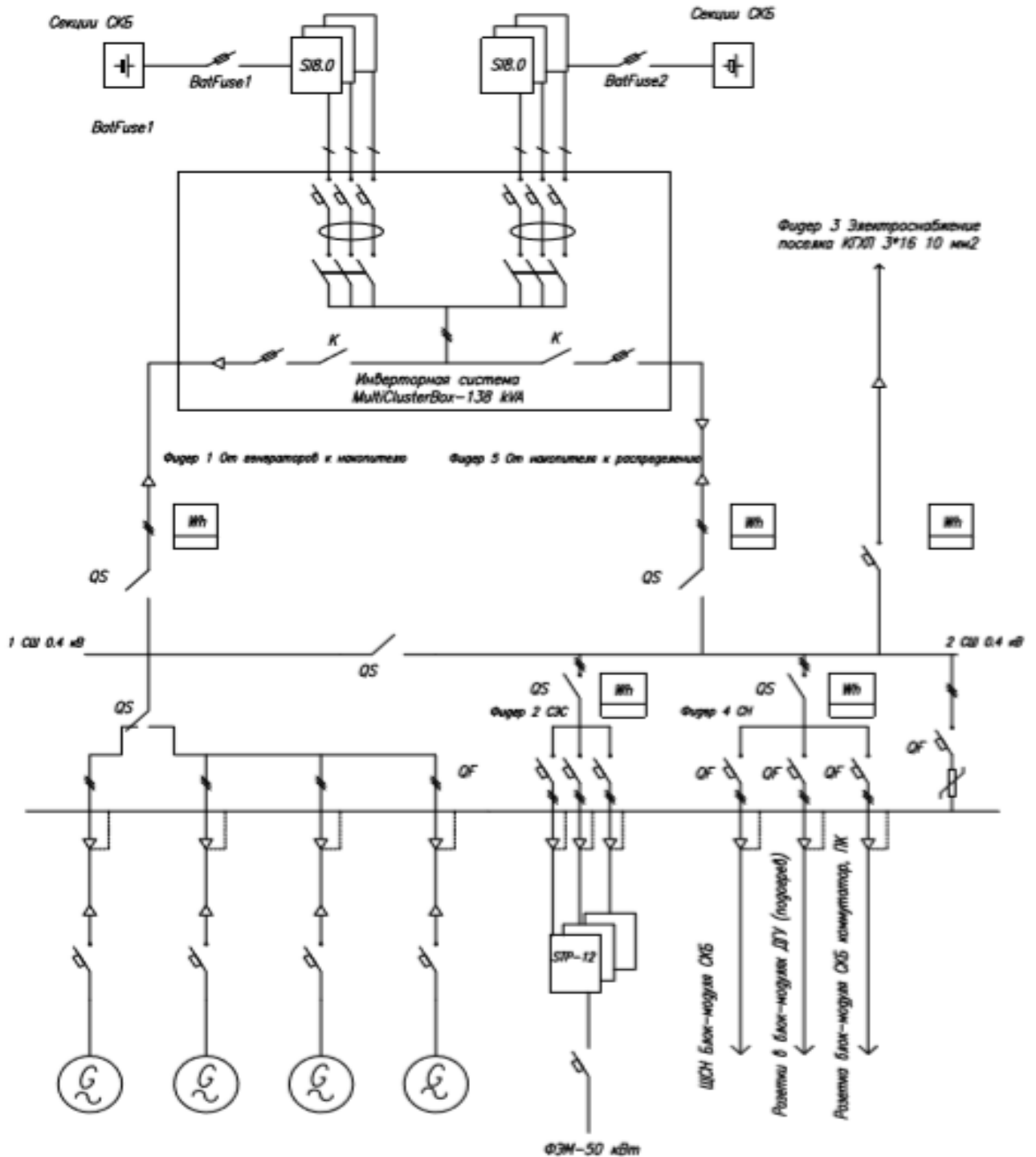


Рисунок 1.28 – Принципиальная схема автономной энергосистемы в с. Батамай

Данный объект имеет следующие особенности: необходимость расчета параметров переходных процессов между ФЭП и ДГУ; высокие требования к селективности и надежности срабатывания РЗА; возможность электропитания СНЭ от ДГУ в случае наступления пасмурной погоды; обязательное наличие

систем теплоснабжения и кондиционирования в здании, где размещены накопительные и силовые элементы солнечной ЭС.

В связи с этим внедрение солнечной ЭС в автономную энергосистему имеет практическую возможность, но существуют сложности в обеспечении и проведении расчетов рабочих параметров и переходных процессов измененной энергосистемы, а также обеспечения ее устойчивого функционирования.

1.5 Перечень внешних факторов, влияющих на функционирование солнечных электростанций

В целях получения достоверных результатов при оценке энергетического потенциала, анализа режимов работы и рабочих характеристик солнечных ЭС на территории Севера необходим учет внешних факторов: солнечная инсоляция; подфакторы, снижающие интенсивность солнечного излучения – облачность и задымление воздушной среды; продолжительность солнечного излучения; поверхностное загрязнение (пыль и снег); поверхностная температура ФЭП [12, 14–15].

Однако для учета внешних факторов при оценке энергетического потенциала, режимов работы и рабочих характеристик солнечных ЭС необходима идентификация характера их влияния путем проведения натурных исследований. Данными факторами являются:

1. Поверхностное загрязнение ФЭП, вызванное мелкодисперсными фракциями пыли. Исследование влияния фактора на функционирование солнечной ЭС рекомендуется выполнить в течение весенне-летнего периода [84].

2. Поверхностное загрязнение ФЭП, вызванное снеговым покровом. Исследование влияния фактора на функционирование солнечной ЭС рекомендуется выполнить в течение зимне-весеннего периода [9, 99].

3. Температура окружающей среды. Исследование влияния фактора на функционирование солнечной ЭС рекомендуется выполнить с применением герметизированной климатической камеры [53].

4. Подфакторы, снижающие интенсивность солнечного излучения – облачность и задымление окружающей среды. Исследование характера влияния подфакторов на функционирование солнечной ЭС рекомендуется выполнить в течение весенне-летнего периода [16, 90].

5. Продолжительность солнечного излучения. Влияние фактора на функционирование солнечной ЭС взаимосвязано геометрическим положением источника излучения и периодом эксплуатации.

6. Влажность воздуха. Влияние фактора на функционирование солнечной ЭС имеет незначительный характер и может быть пренебрежен.

7. Скорость ветра. На значительной части Северо-Востока России среднегодовая скорость ветра составляет 2...3 м/с. При данной скорости ветра воздушные потоки снижают поверхностную температуру ФЭП на 0,17...0,35 °С при температуре окружающей среды +25...35 °С. Также при температуре среды +10...+25 °С и аналогичной скорости ветра поверхностная температура ФЭП практически не меняется. В связи с этим при выполнении расчетов годовой выработки электроэнергии от солнечной ЭС, учитывающих факторы окружающей среды Северо-Востока России, данный фактор может быть пренебрежен.

1.6 Загрязнение окружающей среды Республики Саха (Якутия)

В §1.2 указано, что годовой объем потребления топлива автономными энергосистемами северного энергорайона РС(Я) составляет: более 64 тыс. тонн дизельного топлива; 3,18 тыс. тонн природного газа; 25,52 тыс. тонн угля в год. При сжигании данного топлива в окружающую среду выбрасываются значительные объемы CO₂. В таблице 1.4 представлены удельные показатели образования CO₂ после сжигания каждого вида топлива.

Таблица 1.4 – Показатели образования CO₂ после сгорания топлива [204]

№	Вид топлива	Количество выбросов CO ₂
1.	Природный газ	1,85 т CO ₂ /(тыс. м ³)

№	Вид топлива	Количество выбросов CO ₂
2.	Каменный уголь	2,7–2,8 т CO ₂ /т, в зависимости от марки угля
3.	Торф	~1,5 т CO ₂ /т, одна тонна торфа дает в ~2 раза меньше энергии, чем тонна угля
4.	Топочный мазут	3,1 т CO ₂ /т
5.	Автомобильный бензин	3,0 т CO ₂ /т или 2,1–2,3 кг CO ₂ /л в зависимости от температуры топлива и его марки (летнее более плотное, а зимнее менее плотное)
6.	Дизельное топливо	3,15 т CO ₂ /т или 2,6–2,8 кг CO ₂ /л в зависимости от температуры топлива и его марки (летнее более плотное, а зимнее менее плотное)
7.	Авиационный керосин	3,1 т CO ₂ /т
8.	Древесное топливо и сельскохозяйственные отходы	Выбросы CO ₂ считают равными нулю, так как CO ₂ , поступивший в воздух при горении, ранее был поглощен из атмосферы в процессе роста растений (образуется замкнутый круговорот, не ведущий к росту концентрации CO ₂ в атмосфере)

Существует методика расчета по определению объема выбросов CO₂ в соответствии с выражениями (1.1) – (1.2):

$$M_{y.m.} = m_{н.т.} \cdot \alpha, \quad (1.1)$$

где $M_{y.m.}$ – масса условного топлива, т.у.т.; $m_{н.т.}$ – масса натурального топлива, т.н.т.; α – переводной коэффициент [47].

$$M_{CO_2} = M_{y.m.} \cdot \beta, \quad (1.2)$$

где M_{CO_2} – масса выбросов CO₂, т.; $M_{y.m.}$ – масса условного топлива, т.у.т.; β – переводной коэффициент [49].

В таблице 1.5 представлены примерные годовые объемы выбросов CO₂ по северному энергорайону РС(Я). На рисунке 1.29 представлены объемы выбросов CO₂ энергетическими объектами северного энергорайона РС(Я) с разделением на каждый вид топлива.

Таблица 1.5 – Объем выбросов CO₂ автономными энергосистемами

№	Вид топлива	Количество выбросов CO ₂ , т.
1.	Дизель	148758,4
2.	Природный газ	6161,9
3.	Уголь	68726,5
Итого:		223646,8

В этой связи суммарный годовой объем выбросов CO₂ объектами северного энергорайона РС(Я) составил 223,64 тыс. тонн. Ключевой объем выбросов CO₂ образовывается от ДЭС.

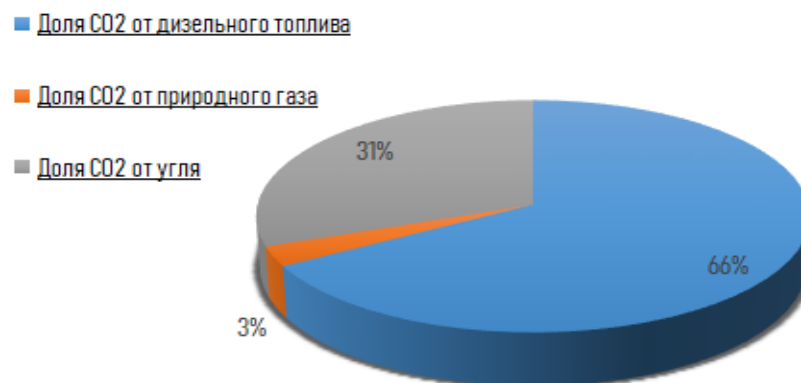


Рисунок 1.29 – Доли выбросов CO₂ в окружающую среду Севера

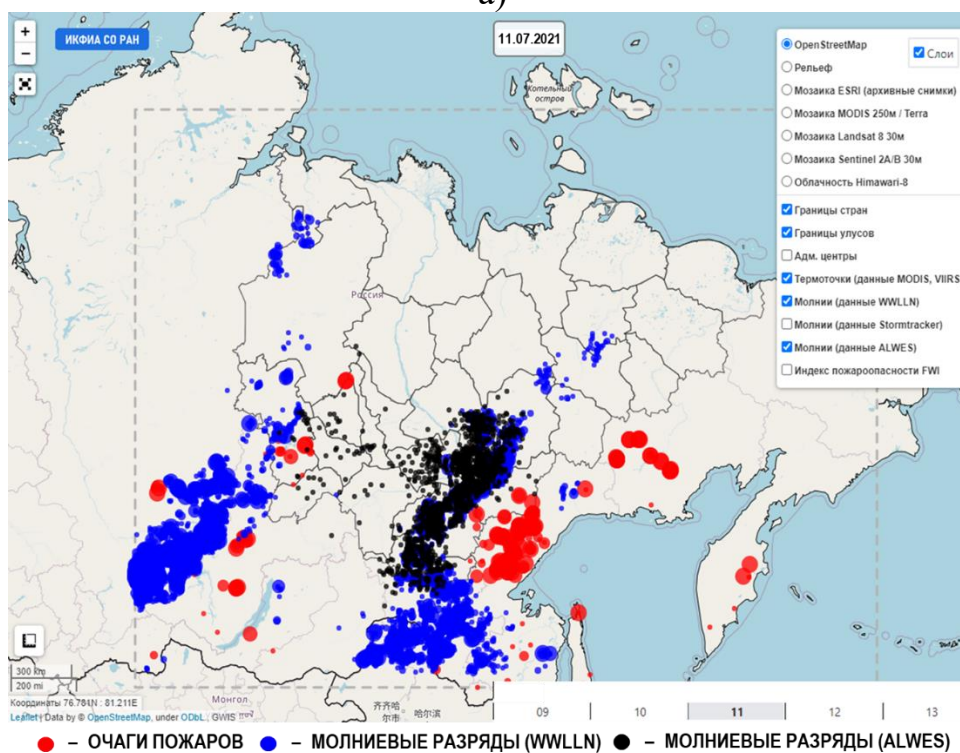
На территории РС(Я) периодически происходят сезонные лесные пожары. В 2021 г. площадь лесных пожаров составила 8...9 млн. гектаров [131], а в 2018 г. – 0,26 млн. гектаров. Скачкообразное увеличение площади лесных пожаров создает условия для возникновения значительного загрязнения окружающей среды. К примеру, только в г. Якутске по состоянию на лето 2021 г. зафиксировано превышение по взвешенным частицам PM_{2,5-1} ПДК (0,16 мг/м³) при ПДК не более 0,16 мг/м³, двух проб по PM₁₀ – от 1.33 ПДК (0,4 мг/м³) до 1.5 ПДК (0,45 мг/м³) при ПДК не более 0,3 мг/м³ [5, 173, 179].

Данная тенденция зафиксирована не только на территории РС(Я), но и в значительной части дальневосточных регионов РФ. На рисунке 1.30 представлены карты прогноза и распространения лесных пожаров по состоянию на лето 2021 г.

Выполнена оценка загрязнения окружающей среды взвешенными веществами вследствие негативного влияния лесных пожаров посредством применения индекса качества воздуха «AQI – Air Quality Index». Индекс качества воздуха в г. Якутске на лето 2021 г. составил 340 AQI, где превышение концентрации взвешенных частиц ($\leq 2,5$ мкм) – 289,9 мкг на 1 м³ (выше на 2800%), чем стандартные показатели ПДК Всемирной Организации Здравоохранения [18, 209]. Выполнены фотоснимки Солнца во время лесных пожаров со степенями задымления, представленные на рисунке 1.31.



а)



б)

Рисунок 1.30 – Карты лесных пожаров на лето 2021 г.:

а) прогноз лесных пожаров; б) фактическое распространение лесных пожаров

Ключевыми причинами образования лесных пожаров являются: сухие грозы (42%); человеческий фактор (41%); сельскохозяйственные палы (7,2%); другие (9,8%). [5, 173]. В этой связи одна из главных причин лесных пожаров – это деятельность человека, связанная сезонным сжиганием сухой травы. Изменение

климата дополнительно создает условия для новых лесных пожаров на фоне увеличения температуры окружающей среды. Исследование характера негативного влияния лесных пожаров на функционирование солнечных ЭС рекомендуется выполнить на весенне-летний период [129, 160].

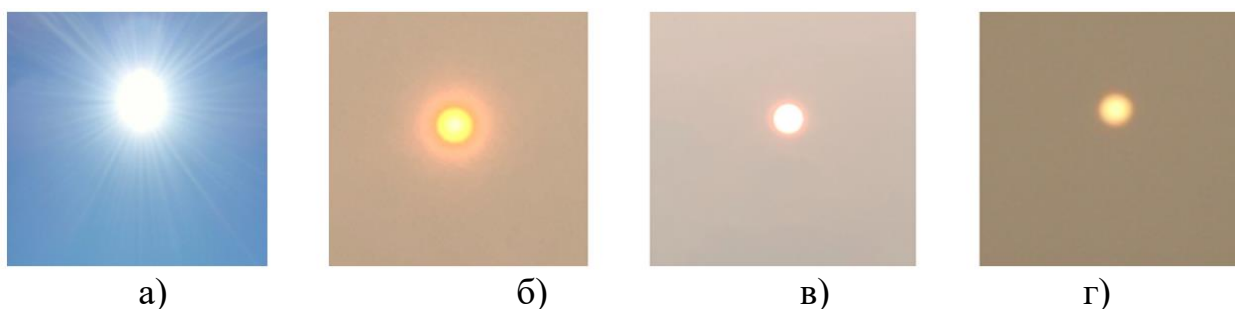


Рисунок 1.31 – Внешний вид Солнца с различными степенями задымления:

а) нулевое; б) малое; в) среднее; г) высокое

В целях защиты ФЭП от негативного влияния лесных пожаров могут применяться системы очистки панелей от золы, что будет препятствовать образованию слоя взвешенных веществ на ее поверхности [38, 82, 85, 119, 159]. Другие решения практически не существуют, т.к. интенсивность лесных пожаров не зависит от технических мероприятий эксплуатирующего персонала солнечной ЭС.

1.7 Причины образования поверхностного загрязнения в условиях Республики Саха (Якутия)

РС(Я) имеет следующие климатические параметры: среднесуточная солнечная радиация на горизонтальную поверхность – 4...4,5 кВт·ч/м²; продолжительность солнечного излучения – 2000...2300 час/год; среднегодовая скорость ветра – 2 м/с; резко-континентальный климат; максимальная летняя температура +38 °С; минимальная зимняя температура –72 °С; наличие многолетней мерзлоты; наличие термокарста; глинистая почва, увеличивающая долю загрязнения среды мелкодисперсными фракциями пыли; загрязнение воздуха в условиях городской среды: содержание Рb (город) – 31 мг/кг при ПДК – 30 мг/кг, Рb (улица) – 45 мг/кг при ПДК – 30 мг/кг, Сг – 67 мг/кг при ПДК – 100 мг/кг. В

г.Якутске параметры запыленности и концентрации тяжелых металлов значительно превышают ПДК по РД 52.44.593–2015 [100].

В Институте мерзлотоведения имени академика П.И. Мельникова СО РАН проведено исследование по определению причин высокой запыленности окружающей среды в г. Якутске. Исследование проведено в три этапа: установка 10 стационарных пылесборников; отбор пробы почво-грунта и снегового покрова в городе. Содержимое пылесборников и образцы снега через специальные фильтры разделены на жидкие и твердые фракции для идентификации концентрации тяжелых металлов [74].

Установлены причины запыления окружающей среды:

1. Тип почвы на территории г. Якутска. Данный фактор обуславливается следующими причинами: распространенность песчано-глинистых почв, склонных к превращению до пылевого состояния в случае процессов высыхания и обнажения почвы посредством гибели растительности по причине высыхания и загрязнения почвы; вырубки деревьев и расширения городской инфраструктуры.

2. Антропогенные факторы. Данный фактор обуславливается следующими причинами: образование значительных объемов взвешенных частиц, содержащихся в выхлопных газах; дыме городских объектов энергетики – Якутская ТЭЦ, Якутская ГРЭС–1 и 2; ввоз песка и почв на территорию города для строительства и отсыпки автомобильных дорог [73, 130, 167].

Тип почвы в центральной части РС(Я) имеет значительное количество песчаных и глинистых фракций и автохтонными железистыми пленками, что в условиях обнажения почвы при строительстве городской инфраструктуры является катализатором увеличения запыленности.

В отчете Якутского УГМС зафиксировано, что в г. Якутске уровень загрязнения атмосферного воздуха в апреле оценивается, как повышенный. Повышенная степень определена концентрациями взвешенных веществ (пыли) и фенола. Наибольшая повторяемость пыли составила 6,6%, максимальная разовая концентрация (стандартный индекс) достигала 1,3 ПДК м.р., среднемесячная – 1,6ПДК с.с. Повторяемость превышений ПДК по фенолу равнялась 1,9%,

стандартный индекс составил 1,2 [72]. На рисунке 1.32 представлен график состава загрязнения воздуха на территории г. Якутска.

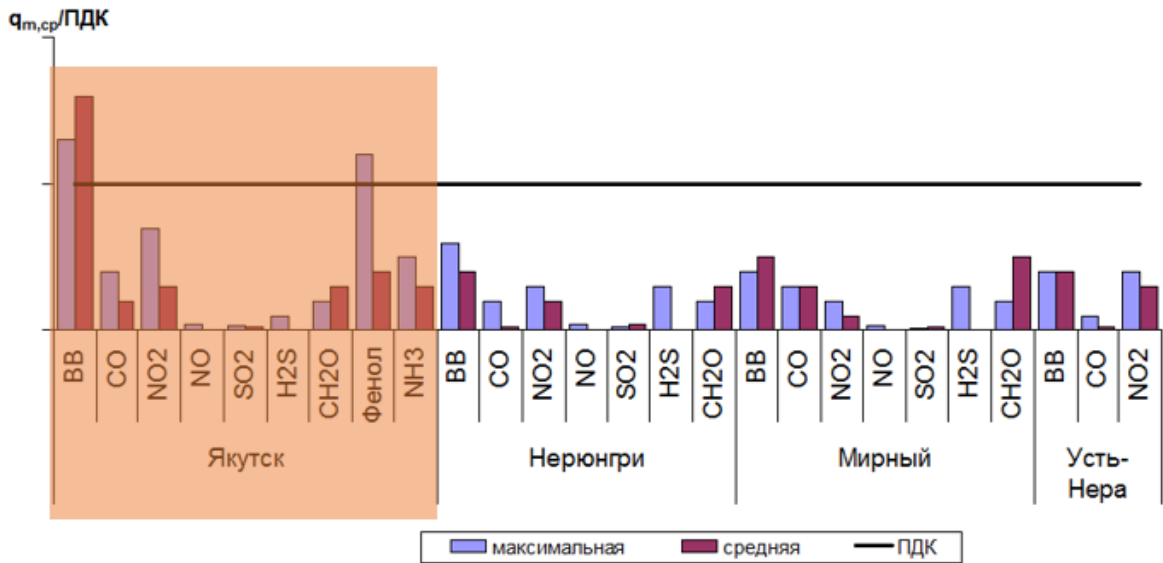


Рисунок 1.32 – Состав загрязнения окружающей среды

Поверхностным загрязнением считается не только слой мелкодисперсных фракций пыли, но и образование снегового покрова. В зимне-весенний период эксплуатации солнечных ЭС на Севере зафиксировано поверхностное загрязнение ФЭП, вызванное образованием снегового покрова. Поверхностное загрязнение уменьшает выработку электроэнергии от ФЭП и ухудшает рабочие характеристики и режимы работы солнечной ЭС. Представлены графики среднемесячной толщины снегового покрова (Рисунок 1.33) [4, 61] за 2015 – 2022 гг. на территории Севера.



Рисунок 1.33 – Графики снегового покрова в г. Якутске

Ключевая часть поверхностного загрязнения, вызванной снеговым покровом, приходится на период «Январь – Март», где толщина снегового покрова составила 27...35 см. Наглядный пример влияния снегового покрова на работу ФЭП представлен на рисунке 1.34.



а)

б)

Рисунок 1.34 – Фотоэлектрические панели с поверхностным загрязнением:

а) загрязнение пылью; б) загрязнение снегом

Исследование показателей влияния поверхностного загрязнения, вызванного образованием снегового покрова, на функционирование солнечной ЭС рекомендуется выполнять в зимне-весенний период.

Выводы по первой главе

1. На сегодняшний день в мире активно эксплуатируются солнечные электростанции в различных системах электроснабжения. Применение солнечных электростанций имеет практическую целесообразность, как в составе автономных энергосистем, так и в системах микрогрид.

2. Определены ключевые направления развития гелиоэнергетики: способы увеличения выработки электроэнергии от солнечных электростанций; моделирование режимов работы солнечных электростанций; оценка энергетического потенциала солнечных электростанций; комбинирование солнечных электростанций с другими источниками энергии и др.

3. Определен перечень внешних факторов Севера, влияющих на функционирование солнечных электростанций: солнечная радиация; подфакторы, снижающие активность солнечного излучения (облачность, задымление воздушной среды); продолжительность светового дня; поверхностное загрязнение (пыль и снеговой покров); температура окружающей среды.

4. Обусловлена необходимость разработки методов оценки энергетического потенциала и технико-экономического обоснования солнечных электростанций, учитывающих различные внешние факторы и позволяющих увеличить достоверность выполняемых расчетов. В существующих методах оценки энергетического потенциала солнечных электростанций выполняется учет только двух факторов: солнечная радиация и геометрические параметры размещения объекта без учета внешних факторов, приводящих к отклонению расчетных данных на 15...20%.

5. При проектировании солнечных электростанций необходимо выполнение не только оценки ее энергетического потенциала с применением математических моделей, но и проведение натурных исследований на месте предполагаемого размещения объекта в целях идентификации характера и показателей влияния внешних факторов на функционирование солнечной электростанции.

6. Определена необходимость разработки новых способов повышения энергоэффективности солнечных электростанций в целях снижения негативного влияния внешних факторов Севера.

ГЛАВА 2 ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ ДЕФИЦИТА АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

2.1 Постановка задачи

В настоящей главе рассмотрены основные закономерности влияния внешних факторов на режим работы и выработку электроэнергии от солнечных ЭС. Выполнено подробное описание исследуемого объекта – солнечной ЭС, на которой запланировано проведение натурных исследований для определения характера и показателей влияния внешних факторов на работу солнечной ЭС.

Сформирована методологическая база из существующих закономерностей, которые подробно описывают электроэнергетические характеристики функционирования ФЭП солнечной ЭС. Представлен необходимый перечень выражений/закономерностей, позволяющий выполнить расчет режимов работы солнечной ЭС, функционирующей в автономной энергосистеме. Установлено, что автономная энергосистема имеет технологический цикл с наличием определенных элементов, таких как: элементы выработки электроэнергии; элементы преобразования/трансформации электроэнергии; элементы передачи электроэнергии.

Предполагается разработка методики расчета рабочих параметров солнечных ЭС, как элемента автономной энергосистемы, отличающаяся учетом внешних факторов Северо-Востока России для последующего получения корректной математической модели.

2.2 Идентификация влияния внешних факторов на функционирование солнечной электростанции

Внедрение и эксплуатация объектов возобновляемой энергетики в ТИТЭС имеет значительную роль в декарбонизации и экологизации отдельных частей ЕЭС

России, целевые показатели которых отражены в Энергетической стратегии РФ на период до 2035 года. Вводятся объекты мини- и микрогрид в виде ветровых и солнечных ЭС микромощности в рамках Федерального закона «Об электроэнергетике» в части развития микрогенерации» от 27.12.2019 N 471–ФЗ и Постановления Правительства РФ от 02.03.2021 года №299 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства РФ в части определения особенностей правового регулирования отношений по функционированию объектов микрогенерации» [189]. Объекты микрогенерации с единичной установленной мощностью 15 кВт могут снабжать электроэнергией до 4...5 стационарных потребителей с возможностью направления излишков электроэнергии в центральную энергосистему. [67].

Наибольший эффект внедрения объектов ВИЭ достигнут в автономных энергосистемах Севера путем уменьшения потребления дорогостоящих ГСМ на фоне слаборазвитой транспортной инфраструктуры и объемов выброса вредных веществ в окружающую среду. В автономных энергосистемах Северо-Востока России применяются дизель-генераторные, газопоршневые, газотурбинные, ветроэнергетические, солнечные энергоустановки микро-, малой и средней мощности [91]. На территории Северо-Востока России применение солнечных ЭС является экономически целесообразным и технически достижимым.

Ключевым показателем функционирования ФЭП является генерирующая мощность, которая зависит не только от электроэнергетических параметров, указанных в выражении (2.1) [117], но и от внешних факторов: солнечная инсоляция, поверхностная температура ФЭП, поверхностное загрязнение ФЭП [89].

$$P_{cn} = E_n \cdot K \cdot \frac{P_{инс}}{E_{инс}}, \quad (2.1)$$

где P_{cn} – установленная мощность ФЭП, Вт; E_n – суточное количество энергии, необходимой для питания всех потребителей, Вт; K – коэффициент потерь,

1,2...1,4; $P_{инс}$ – солнечная инсоляция на горизонтальной поверхности, 1 кВт/м²;
 $E_{инс}$ – табличное значение среднемесячной солнечной инсоляции, кВт·ч/м².

Зависимость генерирующей мощности ФЭП от поверхностной температуры и загрязнения представлена в виде выражения (2.2) [95]:

$$P = Y(E, T_{ФЭП}, \Delta_{загр}), \quad (2.2)$$

где $T_{ФЭП}$ – поверхностная температура ФЭП, °С; $\Delta_{загр}$ – интенсивность образования поверхностного загрязнения ФЭП, о.е.

Интенсивность поверхностного загрязнения ФЭП характеризуется уменьшением генерирующей мощности в зависимости от временного промежутка и представлена в виде выражения (2.3) [38]:

$$\Delta_{загр} = Y'(t, \Delta P), \quad (2.3)$$

где t – период размещения ФЭП в условиях окружающей среды, сутки; ΔP – уменьшение генерирующей мощности ФЭП, Вт/м².

Поверхностная температура ФЭП зависит от скорости движения воздушных потоков у поверхности панели, влажности и температуры окружающей среды и представлена в виде выражения (2.4) [65]:

$$T_{панели} = Y''(V_{ветра}, \varphi_{OC}, T_{OC}), \quad (2.4)$$

где $V_{ветра}$ – скорость движения воздушных потоков у поверхности ФЭП, м/с; φ_{OC} – влажность окружающей среды, %; T_{OC} – температура окружающей среды, °С.

Ключевым внешним фактором функционирования ФЭП является интенсивность солнечного излучения, зависящая от внешних факторов, таких как: облачность [90], задымленность [15], положение источника солнечного излучения [108]. Представлена закономерность зависимости интенсивности солнечного излучения от внешних факторов по выражению (2.5):

$$E = Y'''(\Delta_{обл}^i, \Delta_{дым}^{i'}, \dots, t), \quad (2.5)$$

где $\Delta_{обл}^i$ – уменьшение генерирующей мощности ФЭП в условиях облачности, о.е.;

$\Delta_{дым}^{i'}$ – уменьшение генерирующей мощности ФЭП в условиях задымленности

окружающей среды, о.е.; i – вид облачности; i' – степень задымленности окружающей среды; t – продолжительность солнечного излучения, ч.

По причине влияния внешних факторов выработка электроэнергии от солнечных ЭС может варьироваться в определенных пределах, приводящих к значительному отклонению между фактическими и расчетными данными в этапах разработки технико-экономического обоснования и проектирования.

2.3 Идентификация влияния внешних факторов на показатели качества электроэнергии от солнечной электростанции

По причине значительного изменения выработки электроэнергии от ФЭП в условиях влияния внешних факторов меняются режимы работы, показатели качества электроэнергии от эксплуатируемой солнечной ЭС [44, 69, 146]. Существуют требования в части изменения частоты сети для ветровых и солнечных ЭС [106, 168, 169] в соответствии с выражениями (2.6) – (2.7) и учетом граничных значений (2.8) – (2.9):

$$\Delta P = 20 \cdot P_M \cdot \frac{50.2 - f_{сети}}{50}, \quad (2.6)$$

$$\Delta f = 50.2 - 2.5 \cdot \frac{\Delta P}{P_{ном}}, \quad (2.7)$$

$$50.2 \text{ Гц} \leq f_{сети} \leq 51.5 \text{ Гц}, \quad (2.8)$$

$$47.5 \text{ Гц} \leq f_{сети} \leq 50.2 \text{ Гц}, \quad (2.9)$$

где ΔP – уменьшение генерирующей мощности солнечной ЭС вследствие влияния внешних факторов, Вт/м²; P_M – мгновенная необходимая мощность от солнечной ЭС, кВт; $P_{ном}$ – номинальная мощность солнечной ЭС, кВт; $f_{сети}$ – действительное значение частоты в сети, Гц.

С применением вышеуказанной закономерности выполняется расчет действительного значения частоты сети в условиях изменения выработки от солнечной ЭС. Данные требования не предполагают каких-либо ограничений в диапазоне изменения частоты 47,5...50,2 Гц, а в диапазоне 50,2...51,5 Гц предполагают разгрузку активной мощности с градиентом 40% от исходного

значения. В случае изменения частоты сети энергосистемы вне нормированных значений необходимо выполнить временный останов электростанции от энергосистемы [210].

Иной подход применяется в энергосистеме Ирландии, где ветровые турбины мощностью более 5 МВт должны работать с 5%-м запасом доступной мощности, чтобы осуществлять регулирование в определенном диапазоне частот (например, 49,6...50,5 Гц) [148]. Солнечные ЭС должны функционировать с применением полного регулировочного диапазона [168]:

- Длительное функционирование при изменении частоты электрического тока в диапазоне значений 49...51 Гц, включая верхнюю границу диапазона по частоте.

- Кратковременное функционирование в диапазоне частот электрического тока (включая верхнюю границу указанных диапазонов по частоте): 51...55 Гц – продолжительностью, установленной заводом–изготовителем оборудования; 48...49 Гц – продолжительностью не менее 5 минут; 47...48 Гц – продолжительностью не менее 1 минуты; 46...47 Гц – продолжительностью не менее 1 секунды; 46,0 Гц – не менее 1 секунды.

С изменением частоты сети изменяются мгновенные значения напряжения сети от солнечной ЭС. В материалах теоретических основ электротехники существуют различные закономерности расчета мгновенного значения напряжения, в особенности, при изменении частоты сети, представленные в выражении (2.10) [114]:

$$\begin{cases} u_{\text{мгн}} = U_{\text{max}} \cdot \sin(\omega t + \varphi) \\ \omega = 2\pi f_{\text{факт}}^i \\ u_{\text{мгн}} = U_{\text{max}} \cdot \sin(2\pi f_{\text{факт}}^i t + \varphi) \\ t \in (0,1) \end{cases} \quad (2.10)$$

где $u_{\text{мгн}}$ – мгновенное значение напряжения в сети, В; U_{max} – амплитудное значение напряжения, В; ω – циклическая частота, р/с; φ – угол сдвига фаз, град.; $f_{\text{факт}}^i$ – фактическая частота сети в условиях влияния определенных внешних факторов,

Гц; i – определенный внешний фактор; t – время мониторинга мгновенного значения напряжения в сети, с.

С идентификацией мгновенного значения напряжения сети от сетевой солнечной ЭС возможен расчет среднеквадратичных значений, размах изменения и отклонения напряжения в сети в соответствии с системами уравнений, представленными в выражениях (2.11) – (2.13) [41–43]:

$$\begin{cases} U_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T u^2(t) dt} \\ U_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} U_{max} \sin^2(2\pi ft) dt} \\ U_{rms} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}} \\ T = 0:0.001:1 \end{cases}, \quad (2.11)$$

где U_{rms} – среднеквадратичное значение напряжения, В; u – мгновенное значение напряжения, В; t – время мониторинга мгновенного значения напряжения в сети, с; U_{max} – амплитудное значение напряжения, В; f – действующее значение частоты в сети, Гц.

$$\begin{cases} \Delta U_t^i = \frac{|U_{i'} - U_{i'+1}|}{U_{ном}} \cdot 100\% \\ \Delta U_t^i = \frac{|U_{Ai'} - U_{Ai'+1}|}{\sqrt{2}U_{ном}} \cdot 100\% \end{cases}, \quad (2.12)$$

где ΔU_t^i – отклонение напряжения в сети, %; $U_{i'}$ и $U_{i'+1}$ – значения следующих друг за другом экстремумов или экстремума и горизонтального участка огибающей амплитудных значений напряжения, В; $U_{ном}$ – номинальное значение напряжения в сети, В.

$$\begin{cases} \delta U^i = U^i - U_{ном} \\ \delta U^i = \frac{U^i - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100\% \\ U_{ном} + 10\% \leq U_{ном} + \delta U^i \leq U_{ном} + 10\% \end{cases}, \quad (2.13)$$

где δU^i – отклонение напряжения в сети, %; U^i – действующее значение напряжения прямой последовательности основной частоты, или просто

действующее значение напряжения (при коэффициенте несинусоидальности, меньшем или равном 5%); $U_{ном}$ – номинальное значение напряжения в сети, В.

Солнечные ЭС вне зависимости от типа применяемого генерирующего оборудования должны функционировать с использованием полного регулировочного диапазона по активной и реактивной мощности [106, 168]: длительное функционирование при уменьшении величины напряжения в точке примыкания электростанции к энергосистеме на 25% от номинального значения ($0.75U_{ном}$)²; длительное функционирование при увеличении величины напряжения в точке примыкания электростанции к энергосистеме до наибольшего рабочего значения (U_{max})³.

Амплитудные значения напряжения в сети представлены в таблице 2.1. В случае увеличения величины напряжения в точке примыкания электростанции к энергосистеме необходим учет следующих граничных значений напряжения (включая верхнюю границу указанных диапазонов по напряжению): $1,1U_{ном} \dots 1,1U_{max}$ продолжительностью не менее 20 мин; $1,1U_{max} \dots 1,25U_{max}$ продолжительностью не менее 20 с.; $1,25U_{max} \dots 1,5U_{max}$ продолжительностью не менее 1 с.

Таблица 2.1 – Наибольшие рабочие напряжения для электрических сетей и оборудования различных номинальных напряжений начиная от 35 кВ [148–149]

№	Класс напряжения электрооборудования, кВ	Наибольшее рабочее напряжение электрооборудования, кВ	Номинальное напряжение электрической сети, кВ	Наибольшее длительно допустимое рабочее напряжение в электрической сети, кВ
1.	35	40,5	35	40,5
2.	110	126,0	110,0	126,0
3.	150	172,0	150,0	172,0
4.	220	252,0	220,0	252,0
5.	330	363,0	330,0	363,0
6.	500	525,0	500,0	525,0
7.	750	787,0	750,0	787,0

Таким образом, объекты ВИЭ, функционирующие в интеграции с централизованной или автономной энергосистемой, могут вплотную влиять на показатели качества электрической энергии.

2.4 Идентификация базовых параметров объекта исследования

Объектом выполнения натурных исследований является автономная солнечная ЭС с установленной мощностью 2 кВт (элемент микрогрид) и максимальной электрической нагрузкой – 3 кВт, размещенная в с. Борогонцы центральной части РС(Я).

Населенный пункт находится на термокарстовой зоне при дальнем расстоянии от рек Лена и Алдан (не менее 150 км) и имеет следующие климатические характеристики [206]: резко–континентальный климат; субарктическая климатическая зона; среднегодовая температура среды составляет $-10,1^{\circ}\text{C}$, где абсолютный минимум -62°C и абсолютный максимум $+38^{\circ}\text{C}$; средняя продолжительность солнечного сияния – до 2400 час/год; среднесуточная солнечная инсоляция на горизонтальную поверхность – до $2,96 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$; среднегодовое количество осадков – до 392,33 мм; среднегодовая скорость ветра – 2,1 м/с; среднегодовая влажность воздуха – 74,2%.

Объект исследования питает четыре частных дома на период планового и внепланового отключения электроэнергии от центральной электрической сети. Внешний вид, и схемы функционирования представлены на рисунках 2.1, 2.2, 2.3, 2.4. Функционирование исследуемой солнечной ЭС имеет технологический цикл, который сформирован в виде блок-схемы и представлен на рисунке 2.5.

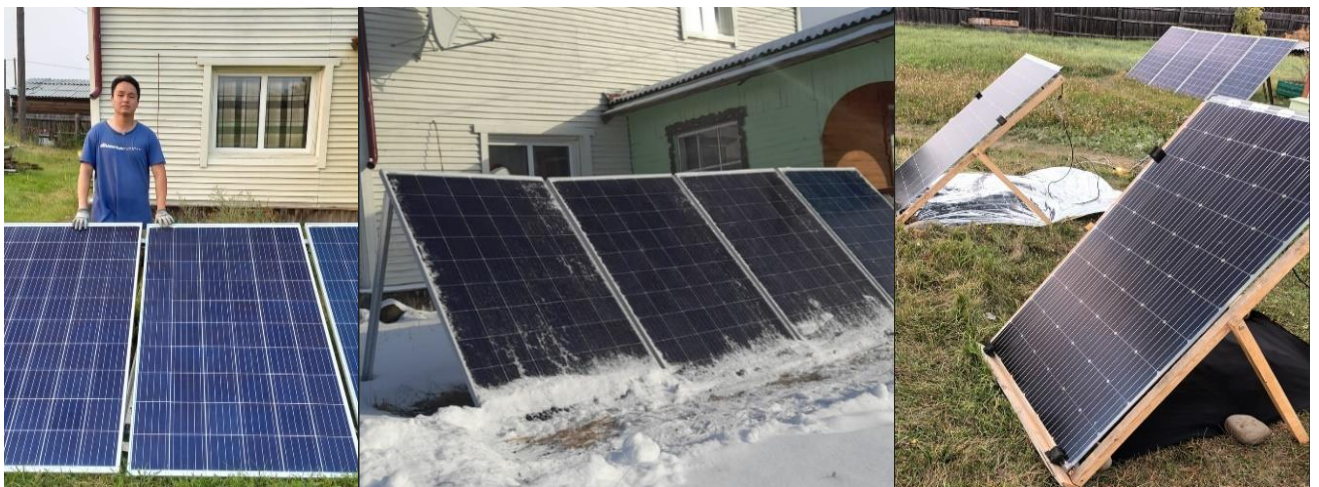


Рисунок 2.1 – Внешний вид исследуемой солнечной электростанции



Рисунок 2.2 – Монтаж исследуемой солнечной электростанции

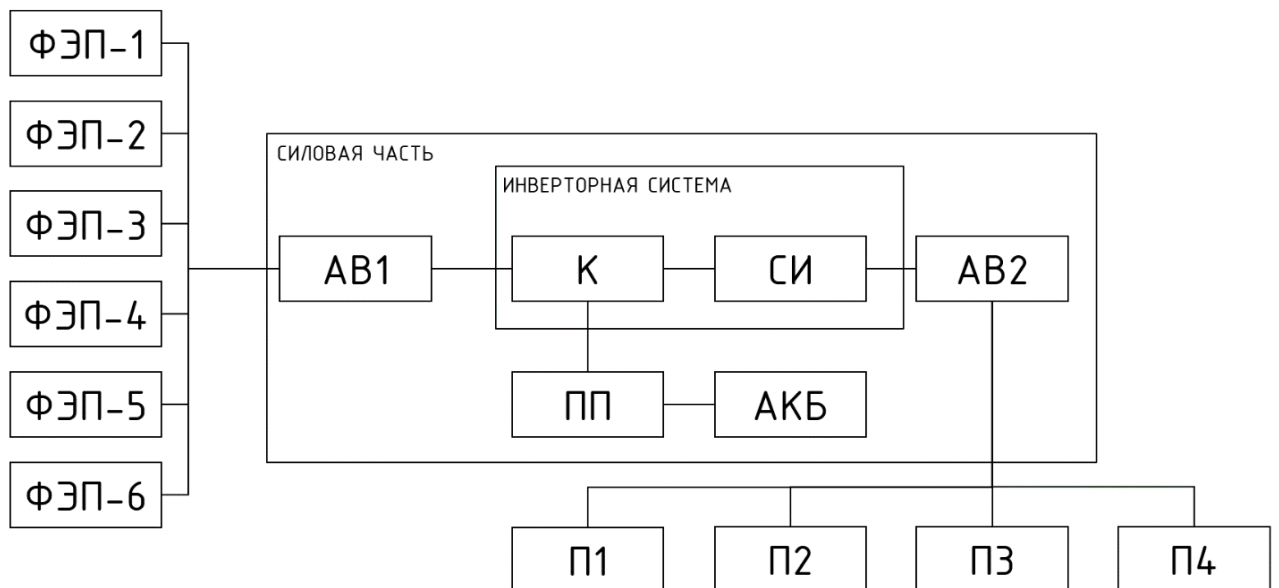


Рисунок 2.3 – Структурная схема солнечной электростанции:

ФЭП – фотоэлектрическая панель; АВ – автоматический выключатель; К – контроллер заряда; СИ – силовой инвертор; ПП – плавкий предохранитель; АКБ – аккумуляторная батарея; П – потребитель

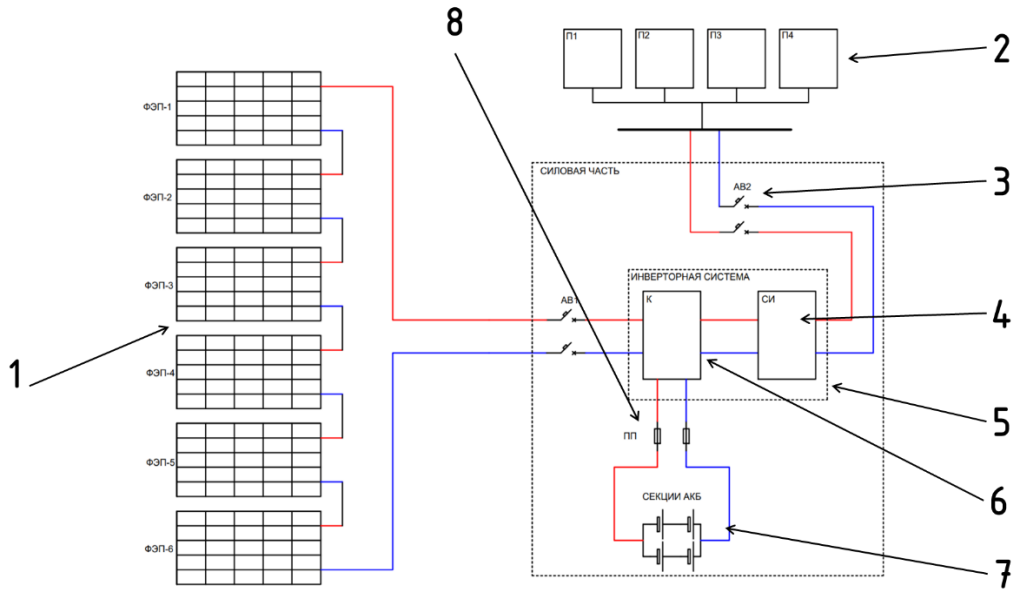


Рисунок 2.4 – Принципиальная схема исследуемой солнечной электростанции:
 1 – фотоэлектрические панели; 2 – потребители; 3 – автоматические выключатели; 4 – силовой инвертор; 5 – инверторная система; 6 – контроллер заряда; 7 – система накопления энергии; 8 – плавкие предохранители.

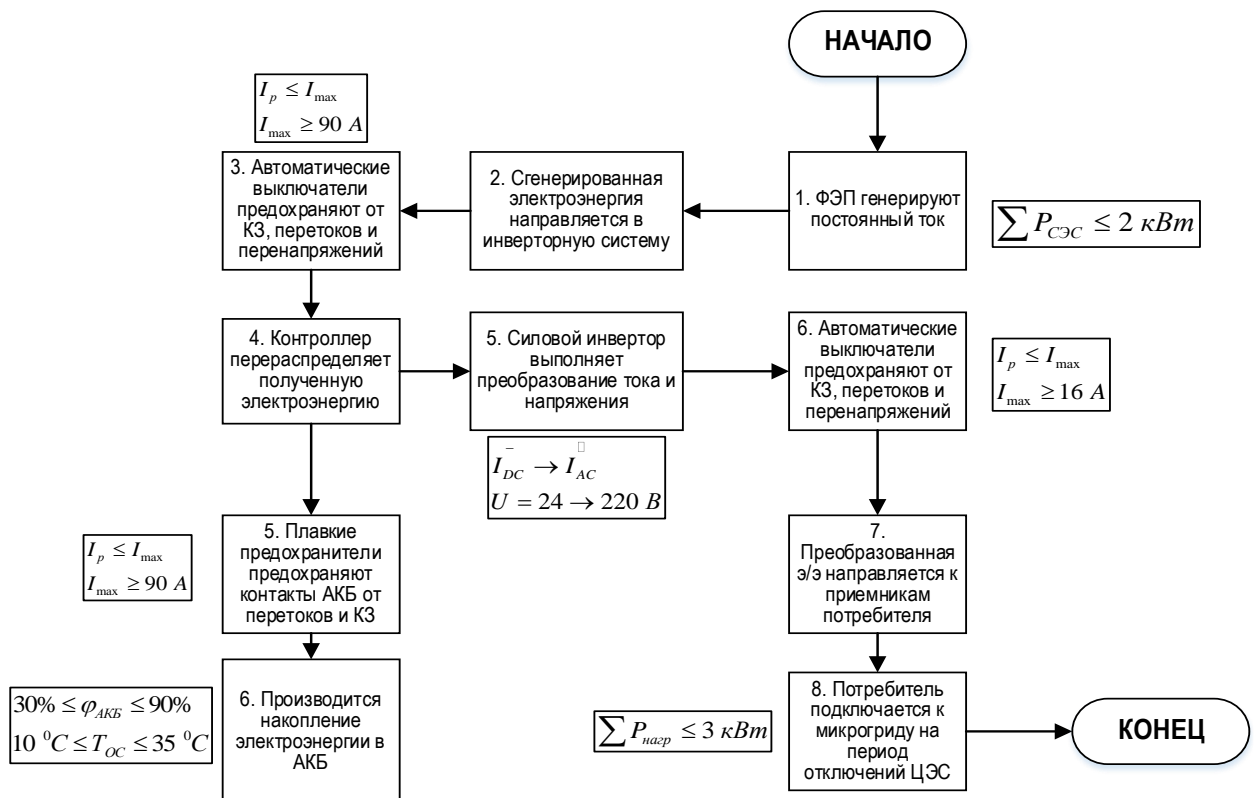


Рисунок 2.5 – Блок-схема алгоритма функционирования исследуемой солнечной электростанции

Объект исследования начинает функционировать в качестве источника резервной мощности на период плановых и внеплановых отключений от центральной электрической сети. Исследуемая солнечная ЭС представляет собой совокупность фото-электротехнического оборудования [163]: поликристаллические ФЭП «Delta 280Вт поли» – 4 ед.; монокристаллические ФЭП «Delta 300Вт DUO» – 2 ед.; аккумуляторные батареи «Delta GEL 12–150» – 4 ед.; инверторная система «SmartWatt Eco 3К 24V 60A MPPT» – 1 ед.; защитная автоматика и плавкие предохранители; наземные несущие конструкции для ФЭП; вспомогательные материалы и кабели; коннекторы MC4.

Объект исследования функционирует в автоматизированном режиме с минимальным участием персонала. В летний период солнечная ЭС полностью снабжает потребителей электроэнергией в течение светового дня. При постепенном уменьшении интенсивности солнечного излучения объект бесперебойно функционирует путем применения СНЭ, которая в течение суток выполняет накопление электроэнергии. В случае снижения уровня заряда АКБ до 20...30% объект прекращает работу для сохранения своей работоспособности.

2.5 Идентификация этапов функционирования объекта исследования

Технологический цикл функционирования исследуемого элемента микрогрид – солнечной ЭС разделен на пять этапов (Рисунки 2.6, 2.7): Этап – 1 «Генерация», где ФЭП вырабатывают электроэнергию в условиях влияния различных внешних факторов; Этап – 2 «Распределение», где сгенерированная электроэнергия в зависимости от нужд потребителя направляется через инверторную систему к дополнительным потребителям микрогрида или в систему накопления энергии; Этап – 3 «Накопление», где центральная электрическая сеть может не только питать нагрузку потребителей, но и функционировать, как источник резервного источника питания для системы накопления энергии в случае некорректной работы ФЭП, в случае образования поверхностного загрязнения панелей, пасмурной погоды и других факторов, так как при уменьшении заряда

секций АКБ ниже 30% ухудшаются электротехнические свойства АКБ, приводящие к уменьшению количества циклов заряда–разряда, увеличению скорости саморазряда и ухудшению общих свойств АКБ; Этап – 4 «Трансформация», где сгенерированная электроэнергия трансформируется через трансформатор увеличением напряжения 0,4...10 кВ в целях последующей передачи к конечному потребителю в случае нахождения при значительных расстояниях от 3 км и более; Этап – 5 «Передача», где преобразованная электроэнергия передается к конечному потребителю с наименьшими потерями при условии внедрения энергоэффективных технологий транспортировки электроэнергии.

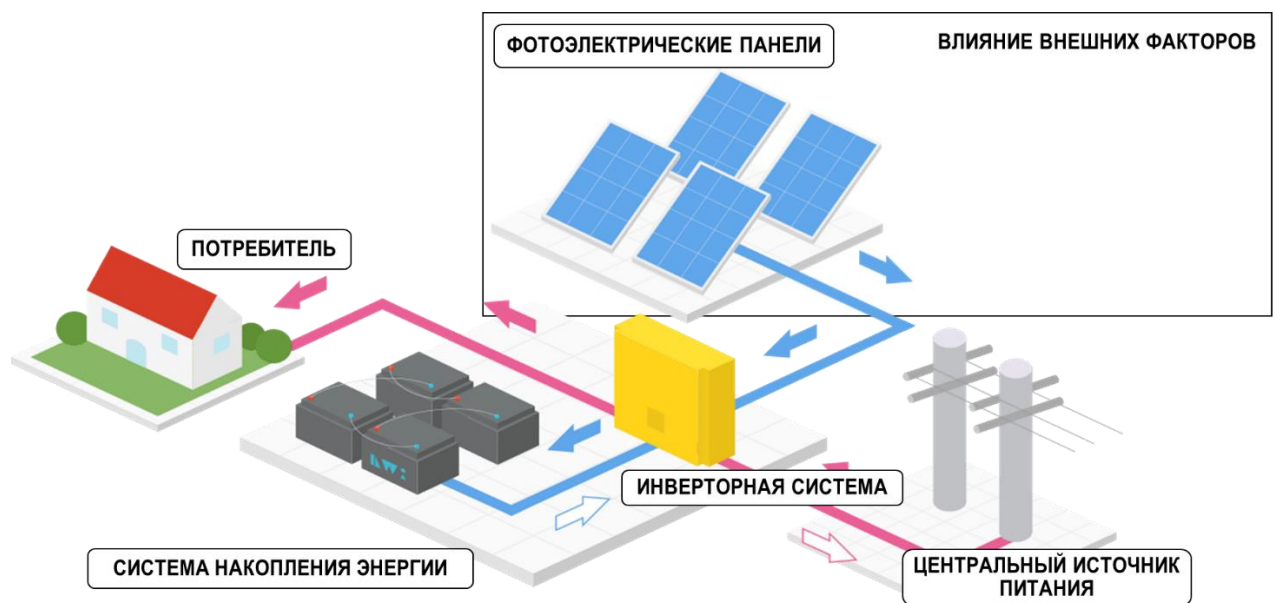


Рисунок 2.6 – Структурная схема исследуемого объекта



Рисунок 2.7 – Циклы функционирования исследуемого элемента микрогрид

Силовая часть солнечной ЭС размещается внутри здания, где поддерживается оптимальная температура (+10...+35 °С) для обеспечения устойчивого функционирования ее элементов. ФЭП размещаются в условиях окружающей среды, тем самым, подвергаются влиянию внешних факторов.

2.6 Идентификация внешних факторов, влияющих на функционирование фотоэлектрической панели

ФЭП солнечной ЭС размещается в условиях окружающей среды, которая подвергается значительному влиянию внешних факторов окружающей среды. На рисунке 2.8 представлен перечень данных факторов с разделением на уровни, влияющие на функционирование ФЭП.

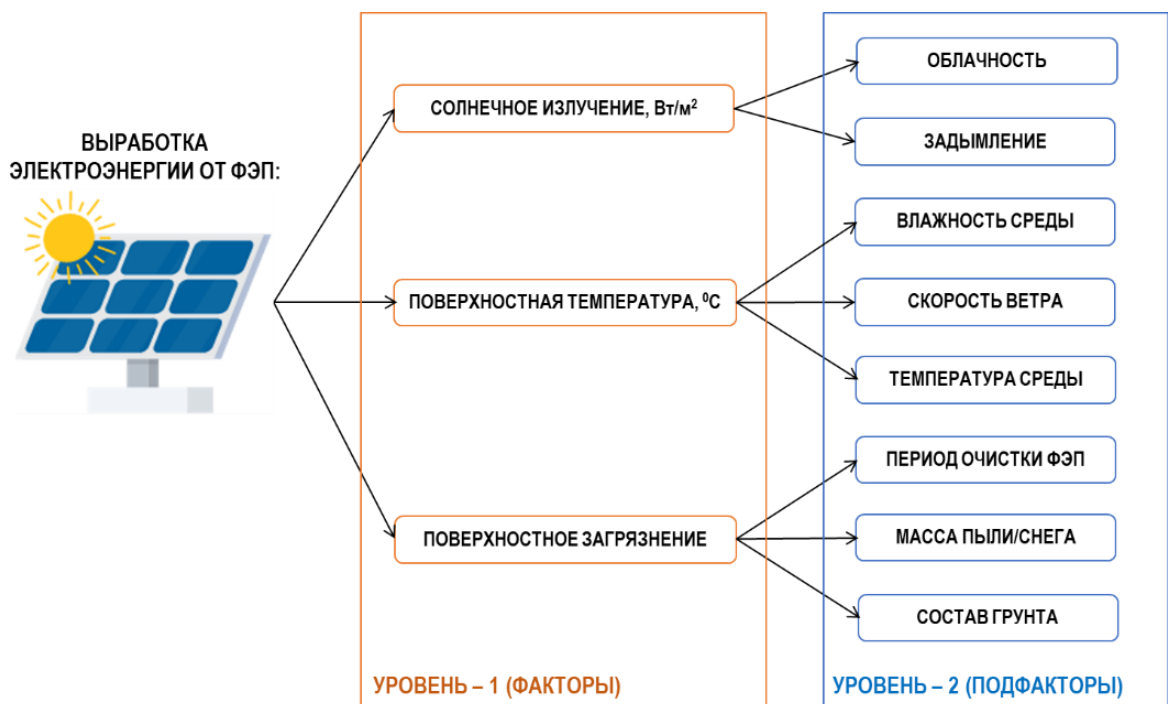


Рисунок 2.8 – Перечень внешних факторов, влияющих на выработку фотоэлектрической панели солнечной электростанции

Выработка электроэнергии от ФЭП солнечной ЭС зависит от трех основных внешних факторов: солнечное излучение; поверхностная температура панели; поверхностное загрязнение панели. Данные факторы зависят от внешних подфакторов: облачность; задымленность; скорость движения воздушных потоков

у поверхности ФЭП; температура окружающей среды; частота очистки поверхности панелей; весовые параметры частиц пыли и снега и т.д.

В этой связи по причине влияния внешних факторов меняются рабочие характеристики солнечных ЭС. В данных условиях следует пропорциональное влияние на режим работы самой энергосистемы, где эксплуатируются солнечные ЭС с увеличением отклонения напряжения в сети (∂V), отклонения частоты сети (∂f) и др.

2.7 Анализ электротехнических закономерностей функционирования фотоэлектрической панели

Описание эквивалентной схемы ФЭП представлено на рисунке 2.9.

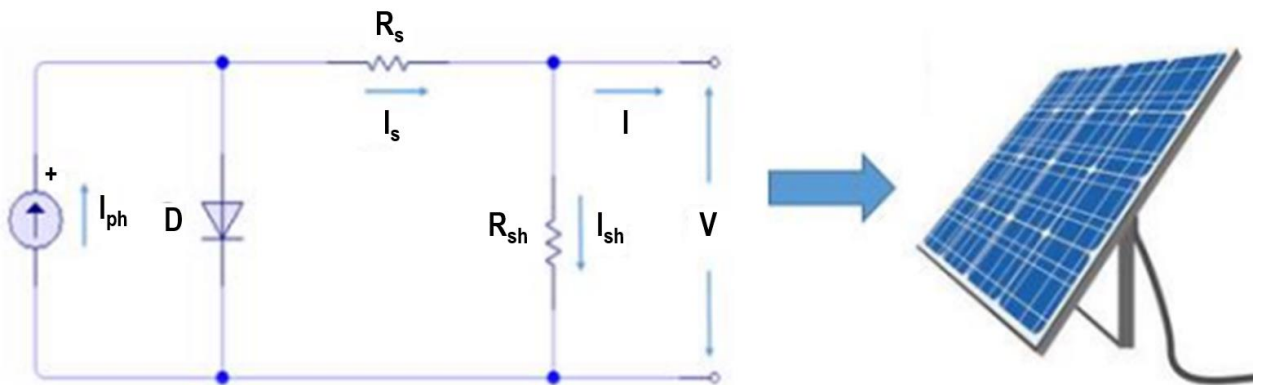


Рисунок 2.9 – Эквивалентная схема фотоэлектрической панели:

R_{sh} – шунтирующее сопротивление; R_s – послед. сопротивление; D – диод

Отношения между током I и напряжением V эквивалентной схемы можно найти, приравняв текущее значение I_{ph} и ток диода I_d , тогда рабочий ток I будет в соответствии с выражениями (2.14) – (2.19) [24, 26, 213–215]:

$$I = \frac{I_{sc} \cdot \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) - V_{oc} \cdot \left(\frac{B}{A}\right)}{1 - \frac{B}{A}} \cdot \frac{G}{G_{stc}} - \left(\frac{I_{sc} \cdot \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) - V_{oc} \cdot \left(\frac{B}{A}\right)}{A - B} - \frac{V_{oc}}{A \cdot R_{sh}} \right), \quad (2.14)$$

$$\cdot \left(e^{\frac{V + I \cdot R_s}{n \cdot V_T}} - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}}$$

$$A = e^{\frac{V_{oc}}{n \cdot V_T}} - 1, \quad (2.15)$$

$$B = e^{\frac{I_{sc} \cdot R_s}{n \cdot V_T}} - 1, \quad (2.16)$$

$$I_{sc} = I_{scm} \cdot N_{cp} + CTI \cdot (T_c - T_{stc}), \quad (2.17)$$

$$V_{oc} = V_{ocm} - 0.0023 \cdot (T_c - T_{stc}) \cdot N_{cs}, \quad (2.18)$$

$$V_t = \frac{k \cdot (t_c + 273)}{q} \cdot N_{cs}, \quad (2.19)$$

где R_s – последовательное сопротивление, Ом; R_{sh} – параллельное сопротивление, Ом; n – фактор идеальности, о.е.; I_{sc} – ток короткого замыкания при нормальных условиях работы (СТУ), А; V_T – напряжение тепловое диодное, мВ; V – рабочее напряжение, В; I – рабочий ток, А; V_{oc} – напряжение разомкнутой цепи при стандартном тестовом условии (СТУ), В; CTI – температурный коэффициент тока короткого замыкания, о.е.; G_{stc} – солнечное излучение при нормальных условиях работы (СТУ), Вт/м²; G – солнечное излучение, Вт/м²; N_{cs} – количество фотоэлементов в серии в солнечном модуле, ед.; N_{CP} – число фотоэлементов параллельно в ФЭП, ед.; T_c – температура ФЭП, °С; T_{stc} – температура ФЭП в тестовых условиях, 25°С; k – Постоянная Больцмана, 1.381·10⁻²³(Дж/К); q – заряд электрона, 1.6·10⁻¹⁹ Кл; n – коэффициент идеальности диода, 1...2.

Сопротивление, соответствующее эквивалентной схеме ФЭП, рассчитывается, как показано в соответствии с выражениями (2.20) – (2.23) [26]:

$$R_s = (1 - \frac{ff}{ff_0}), \quad (2.20)$$

$$R_{sh} = \frac{ff_0 \cdot (\frac{V_{oc}}{V_t} + 0.7)}{1 - \frac{ff}{ff_0}} \cdot \frac{V_{oc}}{I_{sc}}, \quad (2.21)$$

$$ff_0 = \frac{\frac{V_{oc}}{V_t} - \ln(\frac{V_{oc}}{V_t} + 0.72)}{\frac{V_{oc}}{V_t} + 1}, \quad (2.22)$$

$$ff = \frac{V_{mpp} \cdot I_{mpp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}}, \quad (2.23)$$

где ff – фактор заполнения, предоставленный производителем, о.е.; ff_0 – идеальный коэффициент заполнения устройства, о.е.; V_{mpp} – напряжение в точке максимальной мощности вольт– амперной характеристики ФЭП, В; I_{mpp} – ток в точке максимальной мощности вольт-ампера ФЭП, А.

В связи с этим в данном параграфе представлены закономерности, описывающие электротехнические особенности функционирования ФЭП. Уравнения необходимы для получения зависимости влияния различных внешних факторов на рабочие характеристики ФЭП (§2.5).

2.8 Анализ теплотехнических закономерностей функционирования фотоэлектрической панели

Изучена тепловая математическая модель ФЭП с точки зрения тепловых процессов, показана взаимосвязь, существующая между рабочей температурой ФЭП и внешними факторами. В результате проведенного анализа для дальнейшего исследования в работе выбрана тепловая математическая модель определения рабочей температуры ФЭП [26, 205], в которой используются интерактивные методы. На рисунке 2.10 представлена упрощенная тепловая модель ФЭП.

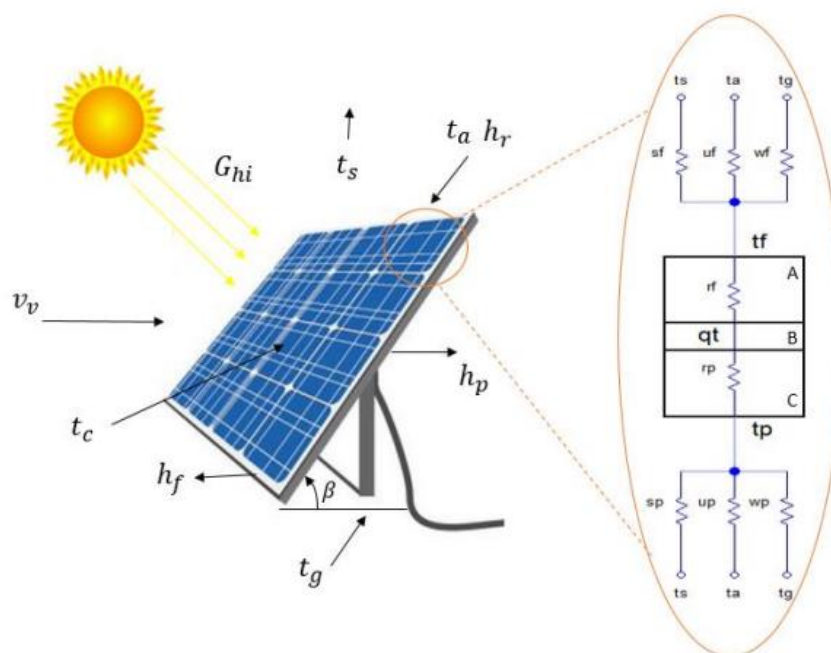


Рисунок 2.10 – Тепловая модель фотоэлектрической панели [205]

Тепловая модель ФЭП описана выражением (2.24):

$$q_t = \infty \cdot (1-r) \cdot G_{hi} - \eta \cdot G_{hi}, \quad (2.24)$$

где q_t – тепловая генерация на единицу площади (Вт/м²); r – доля мощности, отраженная в фотоэлементе, м²·°С/Вт; ∞ – доля мощности, потребляемой фотоэлементом, Вт; G_{hi} – прямое глобальное излучение, Вт/м²; η – КПД ФЭП, %.

Расчет коэффициента конвективной передачи передней части ФЭП (Вт/м·°С) выполняется по выражению (2.25):

$$h_{cf} = [(2.8 - 3 \cdot v_v)^3 + 4.74 \cdot (t_c - t_a)]^{1/3}, \quad (2.25)$$

где v_v – интенсивность движения воздушных потоков, м/с; где t_a – температура окружающей среды, °С; t_c – температура фотоэлемента, °С.

Расчет коэффициента передачи конвекции задней части ФЭП (Вт/м·°С) выполняется по выражению (2.26):

$$h_{cp} = [(2.1 - 2.3 \cdot v_v)^3 + 3.80 \cdot (t_c - t_a) \cdot \sin(\beta)]^{1/3}, \quad (2.26)$$

где β – угол наклона ФЭП, град.

Расчет коэффициента пропускания излучения передней ФЭП (Вт/м·°С) выполняется по выражению (2.27):

$$h_{cp} = \varepsilon_f \cdot [6.67 \cdot 10^{-8} \cdot t_a^3 \cdot (1 + \frac{t_c}{t_a}) \cdot (1 + (\frac{t_c}{t_a}))^2]. \quad (2.27)$$

Коэффициент пропускания излучения задней части ФЭП (Вт/м·°С) вычисляется по выражению (2.28) – (2.31) [26]:

$$h_{rp} = h_{rf} \cdot \left(\frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_p}\right), \quad (2.28)$$

$$r_f = \sum \left(\frac{x}{k}\right)_i \quad r_p = \sum \left(\frac{x}{k}\right)_i, \quad (2.29)$$

$$h_f = h_{cf} + h_{rf} \quad h_p = h_{cp} + h_{rp}, \quad (2.30)$$

где k – проводимость каждого инкапсулирующего слоя, Вт/м·°С; ε_f – коэффициент излучения поверхности лицевой панели, о.е.; ε_p – коэффициент излучения поверхности лицевой части ФЭП, о.е.; x – толщина каждого слоя ФЭП, м.

$$a_f = 1 + h_f \cdot r_f \quad a_p = 1 + h_p \cdot r_p, \quad (2.31)$$

где h_f – общий коэффициент проводимости и фронтальное тепловое излучение, Вт/м⁰С; h_p – коэффициент глобальной проводимости и последующее тепловое излучение, Вт/м⁰С; r_f – сопротивления теплопроводности фронтальных изоляционных материалов, м²·⁰С/Вт; r_p – сопротивление теплопроводности последующих герметизирующих материалов, м²·⁰С/Вт.

Температура точки росы t_{pr} , (⁰С): точка росы – это температура воздуха, при которой содержащийся в нём пар достигает состояния насыщения и начинает конденсироваться в росу, которая вычисляется по выражению (2.32) [26]:

$$t_{pr} = \frac{237,7 \cdot \frac{17,27 \cdot t_a}{237,7 \cdot t_a} + \ln(h_r)}{17,27 - \frac{17,27 \cdot t_a}{237,7 \cdot t_a} + \ln(h_r)}, \quad (2.32)$$

где h_r – относительная влажность, 0...1; t_a – температура окружающей среды, ⁰С.

Эквивалентная абсолютная температура неба, указанная для неба t_s , (⁰С) вычисляется по выражению (2.33):

$$t_s = t_a \cdot \left[0,8 + \frac{t_{pr}}{250}\right]^{1/4}, \quad (2.33)$$

Излучающая способность объекта (коэффициент теплового излучения) – это отношение мощности излучения объекта при данной температуре к мощности излучения абсолютно черного тела (далее – АЧТ). АЧТ представлена в виде поверхности, излучающей максимальное количество энергии при данной температуре. Излучающая способность АЧТ равна 1,0. Коэффициенты теплового излучения, (Вт/м²·⁰С) вычисляются по выражению (2.34) [26]:

$$S_f = S_p = \left[0,711 + 0,56 \cdot \frac{t_{pr}}{100} + 0,73 \cdot \left(\frac{t_{pr}}{100}\right)^2\right] + 0,013 \cdot \cos\left(2\pi \cdot \frac{h}{24}\right) + 1,2 \cdot 10^{-4} \cdot (p_a - 1000), \quad (2.34)$$

где S_f – коэффициенты теплового излучения в небо от передней части ФЭП, Вт/м²·°С; S_p – коэффициенты теплового излучения в небо от задней части ФЭП, Вт/м²·°С; p_a – атмосферное давление, 105 Па; h – часы дня, ч.; t_{pr} – температура точки росы, °С.

Коэффициенты теплового излучения на землю, (Вт/м²·°С) вычисляются по выражению (2.35) – (2.36) [26]:

$$w_f = \left(\frac{6.67 \cdot 10^{-8} \cdot \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \cdot \varepsilon_f}{\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \cdot (1 - \varepsilon_f) + \varepsilon_p} \right) \cdot (t_f^4 - t_g^4) \cdot (t_f - t_g), \quad (2.35)$$

$$w_p = \left(\frac{6.67 \cdot 10^{-8} \cdot \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \cdot \varepsilon_p}{\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \cdot (1 - \varepsilon_f) + \varepsilon_p} \right) \cdot (t_p^4 - t_g^4) \cdot (t_f - t_g), \quad (2.36)$$

где w_f – коэффициенты теплового излучения на землю от передней части ФЭП, Вт/м²·°С; w_p – коэффициенты теплового излучения на землю от задней части ФЭП, Вт/м²·°С; h – часы дня, ч.; t_g – эквивалентные абсолютные температуры почвы, °С.

Последующие уравнения вычисляются интерактивными математическими методами в соответствии с выражениями (2.37) – (2.39) [24, 26]:

$$t_c = \left[\frac{q_t + \left(\frac{w_f}{a_f} + \frac{w_p}{a_p} \right) \cdot (t_g - t_a) + \left(\frac{s_f}{a_f} + \frac{s_p}{a_p} \right) \cdot (t_s - t_a)}{\left(\frac{h_f}{a_f} + \frac{h_p}{a_p} \right)} \right] - t_a, \quad (2.37)$$

$$t_f = \left[\frac{(t_c - t_a) + r_f \cdot w_f \cdot (t_g - t_a) + r_f \cdot s_f \cdot (t_s - t_a)}{a_f} \right] - t_a, \quad (2.38)$$

$$t_p = \left[\frac{(t_c - t_a) + r_p \cdot w_p \cdot (t_g - t_a) + r_p \cdot s_p \cdot (t_s - t_a)}{a_p} \right] - t_a, \quad (2.39)$$

где t_f – абсолютные температуры лицевой поверхности ФЭП, °С; t_a – температура окружающей среды, °С; t_c – температура фотоэлемента, °С; t_g – эквивалентные абсолютные температуры почвы, °С; t_p – абсолютные температуры тыльной поверхности ФЭП, °С.

Данный метод является стандартным подходом, называемым номинальной рабочей температурой ячейки ($T_{НОСТ}$). Температура ячейки (T_c) рассчитывается по выражению (2.40):

$$T_c = T_a + \frac{G_i}{G_{НОСТ}} \cdot (T_{НОСТ} - T_{a,НОСТ}), \quad (2.40)$$

где T_a – температура окружающей среды, °С; G_i – падающее излучение в плоскости ФЭП, Вт/м²; $T_{НОСТ}$ измеряется при падающем излучении $G_{НОСТ} = 800$ Вт/м², температуре окружающей среды +20 °С со скоростью ветра 1 м/с. $T_{a,НОСТ}$ – параметр, предоставленный производителем ФЭП, которая зависит от вида ФЭП, но обычно составляет не более +45 °С [32].

По модели Курца возможен расчет температуры поверхности ФЭП по выражению (2.41):

$$T_c = T_a + I \cdot e^{-3.473 - 0.0594 \cdot V_v}. \quad (2.41)$$

Существуют различные модели для расчета рабочей температуры ФЭП. В данной работе применен один метод, учитывающий вышеуказанный перечень внешних факторов и имеющий высокую степень достоверности.

2.9 Анализ методов краткосрочного прогнозирования функционирования солнечной электростанции

Диспетчерское управление энергосистемы требует у генерирующего предприятия бесперебойное предоставление необходимого количества электроэнергии в пределах 20...50% установленной мощности генерирующих элементов энергосистемы (ДЭС; солнечная ЭС; ветровая ЭС; др.) в конкретный временной промежуток с точностью не менее 30 минут и не более 60 минут при вероятности 0,95 [162].

В этой связи выполнение оценки энергетического потенциала автономной энергосистемы на территории Севера требует высокой достоверности вычислений для более точного прогнозирования выработки электроэнергии. Краткосрочное

прогнозирование функционирования генерирующей части энергосистемы с высокой достоверностью имеет значительную востребованность в планировании режимов работы во всех видах энергосистем.

В солнечных ЭС краткосрочное прогнозирование выработки электроэнергии не имеет проведенной и до конца испытанной технологии и зачастую связано с большими отклонениями прогноза, достигающими иногда 60...65% при сравнении с фактическими данными выработки солнечных ЭС. В то же время прогноз на более длительный период дает более точный результат, то же верно и для области – более точечный прогноз дает менее точный результат [171, 217].

Прогнозирование выработки электроэнергии от солнечных ЭС в значительной мере зависит от количества энергии солнечного излучения, падающей на поверхность ФЭП. Однако на выработку солнечных ЭС также влияют внешние факторы (§1.8). Отсутствие учета данных факторов приводит к значительному отклонению между фактическими и расчетными данными выработки электроэнергии и режимов работы солнечных ЭС. Существующие методы прогнозирования выработки электроэнергии и режимов работы солнечных ЭС можно разделить на четыре ключевые группы (Рисунок 2.11) [171]:

- Физические модели описывают физические отношения между погодными условиями и солнечной радиацией, полученными с использованием численного прогноза погоды, выработкой электроэнергии и режимов работы солнечных ЭС.
- Статистические модели описывают взаимосвязь между плотностью потока солнечного излучения, полученной с использованием численного прогноза погоды, выработкой электроэнергии и режимов работы на солнечных ЭС путем статистического анализа временных рядов ретроспективных данных без учета физических факторов.
- Адаптивные модели используют системы искусственного интеллекта с целью определения связи между прогнозируемыми погодными условиями и выходной мощностью и режимами работы солнечных ЭС.
- Гибридные модели в большинстве случаев представляют комбинацию физических и статистических моделей.

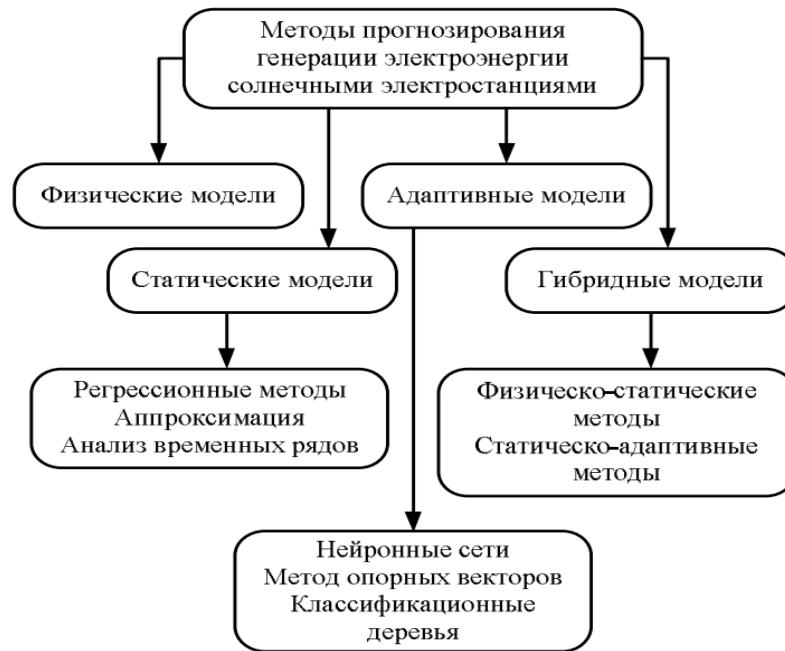


Рисунок 2.11 – Методы прогнозирования работы солнечных электростанций

В связи с этим при разработке модели оценки энергетического потенциала (кратко– и среднесрочного прогнозирования выработки) и расчета режимов работы солнечных ЭС, учитывающей внешние факторы, рекомендуется применение гибридного метода прогнозирования, где вводятся физические отношения между ключевыми внешними факторами на функционирование солнечных ЭС и численный прогноз погодных условий с учетом анализа предыдущих данных окружающей среды с глубиной не менее 5...10 лет на месте размещения рассматриваемого объекта. Необходимо, чтобы разрабатываемая модель оценки энергетического потенциала и расчета режимов работы солнечных ЭС имела среднестатистическое отклонение между прогнозируемыми и фактическими данными выработки не более $\pm 5...10\%$ в определенный момент времени с вероятностью не менее 0,95.

2.10 Модель расчета рабочих параметров функционирования инвертора

Трехфазный сетевой инвертор представляет собой схему с тремя параллельными ветвями, где в каждой ветви содержится по 2 транзистора (Рисунок 2.12) [25, 26]. Важным компонентом солнечной ЭС является преобразователь,

который имеет повышающий преобразователь напряжения (AC/DC–преобразователь) – 200...700 В, трехфазный инвертор, выполненный на основе IGBT–модулей по трехфазной мостовой схеме, пропорционально–интегральные регуляторы тока и напряжения (ПИ). Период открытия и закрытия IGBT – модулей составляет несколько миллисекунд, что позволяет эффективно использовать принцип широтно-импульсной модуляции (ШИМ) в целях получения синусоидальных напряжений на выходе трехфазного сетевого инвертора [26].

Генератор PWM отвечает за доставку сигнала переключения на полупроводниковые устройства питания. Для данной системы применялась синусоидальная модуляция по ширине униполярного импульса. Основная частота модулированной волны должна иметь значение, равное значению желаемого выхода, в этом случае желаемая частота равна 50 Гц [26, 159, 165].

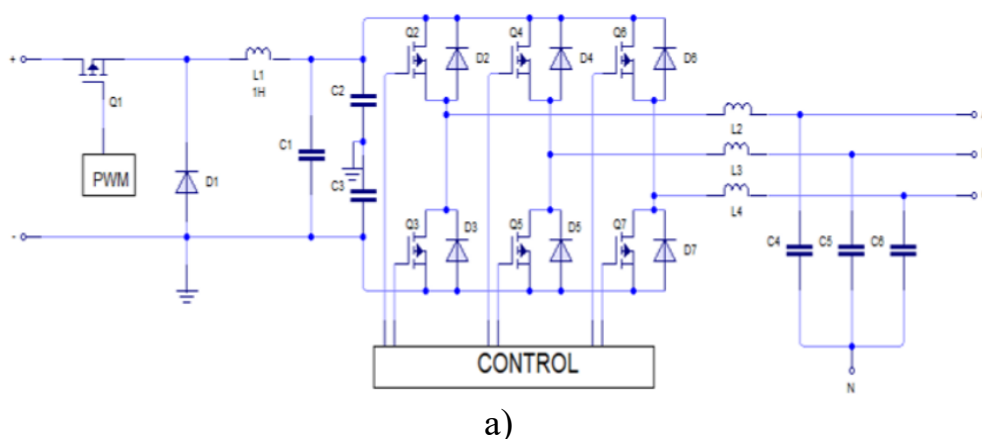


Рисунок 2.12 – Принципиальная схема и внешний вид сетевого инвертора:

а) принципиальная схема сетевого инвертора; б) внешний вид сетевого инвертора

Ступень питания состоит из полупроводниковых переключающих устройств, в этом случае смоделирована полная система мостового преобразования типа

постоянного тока в переменный, как показано на рисунке 2.10 [26]. Уравнения, описывающие математическое поведение преобразователя мощности BOOST, вычисляются по выражениям (2.42) – (2.44) [24]:

$$\frac{Ld_i}{dt} = V_i - (1 - D) \cdot V_c, \quad (2.42)$$

$$\frac{Cd_v}{dt} = (1 - D) \cdot I_L - \frac{V_c}{R}, \quad (2.43)$$

$$V_0 = \frac{V_i}{1 - D}, \quad (2.44)$$

Входной конденсатор работает как источник напряжения, а катушки индуктивности – источники тока. Данная схема решается путем применения законов Кирхгофа с учетом падения напряжения в каждом компоненте или тока, протекающего через него, из которого идентифицируются выражения (2.45) – (2.46). Для части переменного тока:

$$\begin{aligned} [V_{BC}] = L \frac{d}{dt} \cdot [I_b - I_c] + [V_b - V_c] &= L \frac{d}{dt} \cdot [I_{bc}] + V_{bc}, \\ [V_{CA}] &= L \frac{d}{dt} \cdot [I_c - I_a] + [V_c - V_a] = L \frac{d}{dt} \cdot [I_{ca}] + V_{ca}, \end{aligned} \quad (2.45)$$

$$\text{где } \frac{d}{dt} \cdot [I_{bc}] = \frac{1}{3L} \cdot [V_{AB}] - \frac{1}{3L} \cdot [V_{bc}]$$

$$\frac{d}{dt} \cdot [I_{ca}] = \frac{1}{3L} \cdot [V_{CA}] - \frac{1}{3L} \cdot [V_{ca}]$$

Для части постоянного тока:

$$i_{dc} = C \frac{d_{v_{dc}}}{dt} + \frac{v_{dc}}{R} \Rightarrow \frac{d_{v_{dc}}}{dt} = \frac{1}{C} i_{dc} - \frac{v_{dc}}{RC}, \quad (2.46)$$

В связи с этим описаны необходимые закономерности в целях приведения математической модели функционирования сетевого инвертора напряжения внутри солнечной ЭС.

2.11 Модель расчета рабочих параметров функционирования объектов трансформации электроэнергии

На рисунке 2.13 представлены схемы функционирования трехфазного силового трансформатора с указанием параметров функционирования первичной и вторичной обмотки. В автономных энергосистемах Севера с солнечными ЭС

применяются трехфазные силовые трансформаторы для увеличения величины напряжения с последующей передачей к конечным потребителям на относительно значительные расстояния. В рамках построения модели данной части системы необходим учет ключевых закономерностей функционирования трехфазных силовых трансформаторов в соответствии с выражениями (2.47) – (2.48):

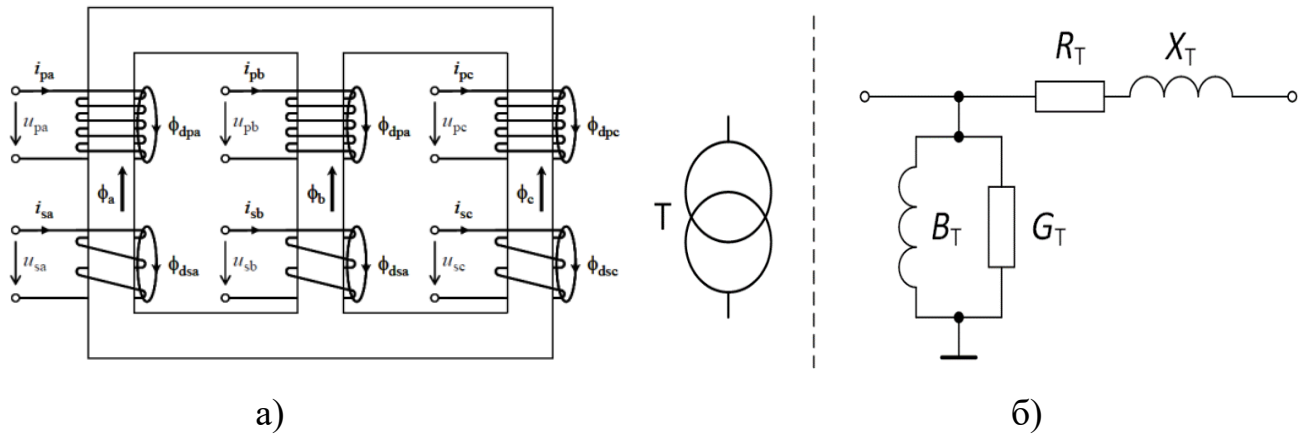


Рисунок 2.13 – Схемы трехфазного силового трансформатора:

а) структурная схема; б) схема замещения

$$\left\{ \begin{array}{l} R_T = \Delta P_K \cdot \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}^2} \\ X_T = \frac{U_K}{100\%} \cdot \frac{U_{ном}^2}{S_{ном}} \\ G_T = \frac{\Delta P_{xx}}{U_{ном}^2} \\ B_T = \frac{I_{xx}}{100\%} \cdot \frac{S_{ном}}{U_{ном}^2} \\ k_t = \frac{U_{BH}}{U_{HH}} \end{array} \right. , \quad (2.47)$$

где R_T – активное сопротивление трансформатора, Ом; X_T – реактивное сопротивление трансформатора, Ом; G_T – активная проводимость трансформатора, См; B_T – емкостная проводимость трансформатора, См; k_t – коэффициент трансформации; ΔP_K – потери активной мощности в режиме короткого замыкания, Вт; ΔP_{xx} – потери активной мощности в режиме холостого хода, Вт; $U_{ном}$ – номинальное напряжение стороны трансформатора, В; $S_{ном}$ – номинальная

мощность трансформатора, ВА; U_K – напряжение короткого замыкания трансформатора, %; I_{xx} – ток холостого хода трансформатора, %.

$$\begin{cases} u_{pk} = R_p \cdot i_{pk} + L_{dp} \cdot \frac{di_{pk}}{dt} + e_{pk}, \\ u_{sk} = R_s \cdot i_{sk} + L_{sp} \cdot \frac{di_{sk}}{dt} + e_{sk} \end{cases} \quad (2.48)$$

где u_{pk} – напряжение первичной обмотки, В; u_{sk} – напряжение вторичной обмотки, В; R_p – сопротивление первичной обмотки, Ом; R_s – сопротивление вторичной обмотки, Ом; i_{pk} – ток первичной обмотки, А; i_{sk} – ток вторичной обмотки, А; e_{pk} – индуцированное напряжение в первичной обмотке, В; e_{sk} – индуцированное напряжение во вторичной обмотке, В; L_{dp} – коэффициент первичной самоиндукции, о.е.; L_{sp} – коэффициент вторичной самоиндукции, о.е. [24, 26].

В связи с этим описаны необходимые закономерности в целях приведения математической модели функционирования трехфазного силового трансформатора для преобразования напряжения от солнечной ЭС.

2.12 Модель расчета показателей солнечного излучения и продолжительности светового дня в зависимости от местоположения солнечной электростанции

Солнечная радиация, приходящаяся на поверхность ФЭП, характеризуется профилем освещенности (солнечного излучения), как функцией зависимости времени в течение светового дня, зависящая от угла между направлением на источник солнечного излучения и плоскостью расположения ФЭП (Рисунок 2.14).

Необходим расчет данной функции для определения эффективного использования прямого преобразования гелио-энергии в определенном (заданном) регионе [26, 222]. Количество гелио-энергии, которое может преобразовать солнечная ЭС, зависит от широты места, на котором она располагается, от угла ее

наклона ФЭП относительно направления на юг, от времени года и склонения Солнца [26, 222].

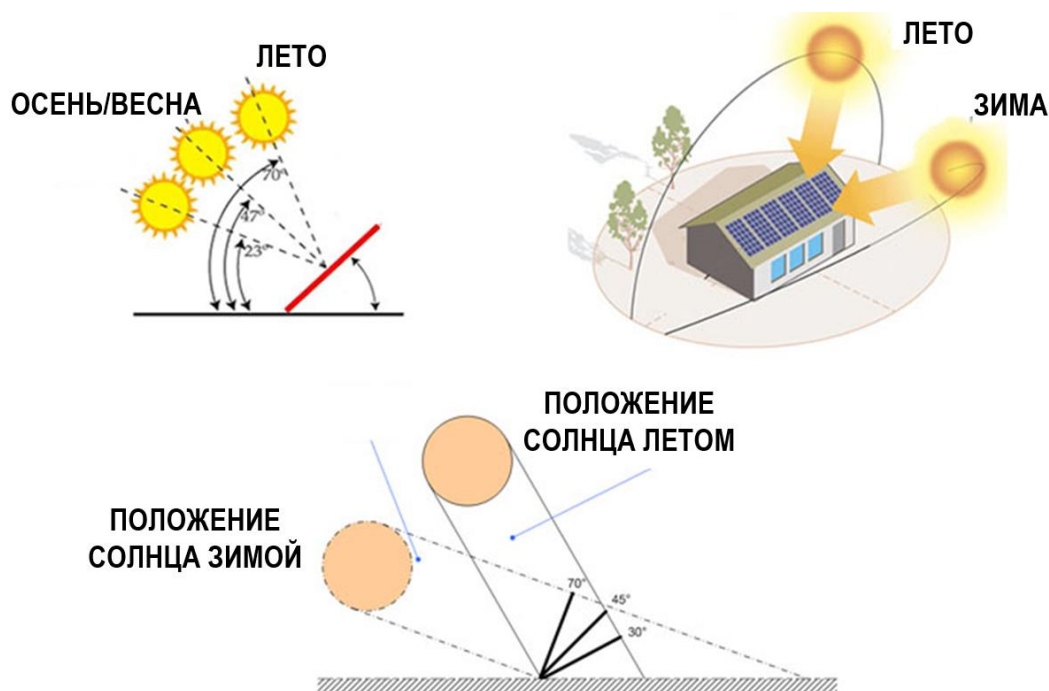


Рисунок 2.14 – Изменение траектории движения Солнца относительно фотоэлектрической панели в зависимости от периода эксплуатации

Часовой угол источника солнечного излучения определяется по выражениям (2.49) – (2.50) [162]:

$$w = \left(\frac{\pi}{12}\right) \cdot \left[t_{utc} - 12 \cdot \left(\frac{L_{loc} - L_{utc}}{15}\right) + \frac{E}{60} \right], \quad (2.49)$$

$$t_{utc} = h - \left(\frac{L_{loc} - L_{utc}}{15}\right), \quad (2.50)$$

где L_{loc} – географическая долгота места, град.; h – время суток, ч.; w – угол солнечного времени, град.; t_{utc} – стандартное время, ч.; L_{utc} – длина опорного меридиана, град.

Необходим учет уравнения коррекции времени (Spencer 1971), представленной по выражениям (2.51) – (2.52):

$$E = 229.18 \cdot (7.5 \cdot 10^{-6} + 1.868 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(e) - 32.077 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(e) - 11.4615 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(2e) - 40.89 \cdot 10^{-3} \cdot \sin(2e)), \quad (2.51)$$

$$e = 2\pi \cdot \left(\frac{n_d - 1}{365}\right), \quad (2.52)$$

После данных процедур необходимо проведение расчета склонения источника солнечного излучения в соответствии с выражениями (2.53) – (2.58) [26]:

$$\delta = 6.915 \cdot 10^{-3} - 0.39912 \cdot \cos(e) + 70.257 \cdot 10^{-3} \cdot \text{sen}(e) - 6.758 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(2e), \quad (2.53)$$

$$+ 0.907 \cdot 10^{-3} \cdot \text{sen}(2e) + 2.692 \cdot \cos(3e) + 1.48 \cdot 10^{-3} \cdot \text{sen}(3e)$$

$$\theta_z = \cos^{-1}(\sin(\delta) \cdot \sin(\varphi) + \cos(\delta) \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(w)), \quad (2.54)$$

$$\theta = \cos^{-1}(\beta) \cdot \cos(\theta_z) + \text{sen}(\beta) \cdot \text{sen}(\theta_z) \cdot \cos(\gamma_s - \gamma), \quad (2.55)$$

$$\gamma_s = \text{seg}(w) \left| \frac{\cos^{-1}(\theta_z) \cdot \text{sen}(\varphi) - \text{sen}(\delta)}{\text{sen}(\theta_z) \cdot \cos(\varphi)} \right|, \quad (2.56)$$

$$\alpha = \text{sen}^{-1}(\cos(\theta_z)), \quad (2.57)$$

где δ – угол солнечного склонения, град.; θ_z – угол сенитал, град.; φ – географическая широта места, град.; h – время суток, ч.; β – угол наклона ФЭП относительно горизонтали, град.; γ_s – солнечный азимут, град.; w – угол солнечного времени, град.; α – солнечный угол высоты, град.; n_d – день года, сутки.

$$r_b = \cos(\beta) + \text{sen}(\beta) \cdot \tan(\theta_z) \cdot \cos(\gamma_s - \gamma). \quad (2.58)$$

Представлено уравнение для расчета падающего горизонтального солнечного излучения на наклонную плоскость ФЭП по выражениям (2.59) – (2.65):

$$G_{oh} = [1.37 \cdot (1 + 0.033 \cdot \frac{\cos(2\pi \cdot n_d)}{365}) \cdot \sin(\delta) \cdot \sin(\varphi) + \cos(\delta) \cdot \cos(\varphi) \cdot \cos(w)] \cdot 1000, \quad (2.59)$$

$$k_t = \frac{G_h}{G_{oh}}, \quad (2.60)$$

$$(0.22 < k_t < 0.8) \rightarrow f = 0.9511 - 0.1604k_t + 4388k_t^2 - 16.638k_t^3 + 12.336k_t^4, \quad (2.61)$$

$$(k_t > 0.8) \rightarrow f = 0.165 \quad (k_t \leq 0.2) \rightarrow f = 1 - 0.09$$

$$G_{dh} = (f \cdot I_h), \quad (2.62)$$

$$G_{bh} = I_h - (f \cdot I_h), \quad (2.63)$$

$$\tau_b = (1 - f) \cdot k_t, \quad (2.64)$$

$$G_i = r_b \cdot (I_{bh} + \tau_b \cdot I_{dh}) + (1 - \tau_b) \cdot G_{dh} \cdot \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) + \rho_g \cdot G_h \cdot \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right), \quad (2.65)$$

где G_h – горизонтальное солнечное излучение, Вт/м²; ρ_g – коэффициент отражения почвы, о.е.; G_{dh} – горизонтальное почасовое прямое излучение, Вт/м²; G_{bh} – горизонтальное диффузное почасовое излучение, Вт/м²; k_t – почасовой индекс ясности, о.е.; G_i – горизонтальное излучение в наклонной плоскости, Вт/м².

В связи с этим описаны необходимые закономерности для определения профиля солнечного излучения и продолжительности светового дня в зависимости от местоположения исследованного объекта.

2.13 Модель расчета рабочих параметров функционирования солнечной электростанции

Формирование описания математической модели производится в соответствии с общепринятыми требованиями и условиями, а именно: построение математической модели, разработка метода расчета, программирование, расчеты на персональном компьютере, сравнение результатов расчетов с данными опыта и уточнение моделей [25, 197, 200, 202, 208, 211].

В рамках описания математической модели определяются обязательные факторы, электроэнергетические закономерности расчета выработки от объектов ВИЭ [145, 201, 212, 217, 218, 220].

При расчете вырабатываемой энергии необходим учет потерь на функционирование системы накопления энергии, контроллеров заряда и силового инвертора в соответствии с выражением (2.66).

$$E_g = \frac{\eta \cdot E_{инс} \cdot P_{cn}}{P_{инс} \cdot K}, \quad (2.66)$$

где η – коэффициент полезного действия типа ФЭП, %; $E_{инс}$ – табличное значение среднемесячной инсоляции в данном регионе, кВт·ч/м²; E_g – вырабатываемая энергия ФЭП, Вт·ч; P_{cn} – установленная мощность ФЭП, Вт; $P_{инс}$ – мощность солнечной инсоляции на земной поверхности на 1 м², 1 кВт/м²; K – коэффициент потерь на заряд-разряд АКБ, обычно принимают равным 1,2.

Существуют определенные коэффициенты учета вида погодных условий в целях обеспечения максимальной достоверности моделирования с применением трех видов погодных условий с указанием коэффициентов эффективности функционирования ФЭП ($K_{\text{пог.усл}}$): ясная погода – $K_{\text{пог.усл1}} \approx 1,0$; облачная погода – $K_{\text{пог.усл2}} \approx 0,7$; атмосферные осадки (дождь, снег и др.) – $K_{\text{пог.усл3}} \approx 0,25$.

После определения коэффициентов эффективности функционирования ФЭП при различных погодных условиях необходимо приведение количества дней в году в соответствии с учетом видов погодных условий (ясные, облачные и пасмурные дни) [34, 135, 137, 195]. Рекомендуется применение базы данных электронных ресурсов: база данных – 1 «Погода 360. Прогноз. Статистика»; база данных – 2 «ГИС Метео».

В модели выполнен сбор информации о количестве ясных, облачных и пасмурных дней на каждый месяц в зависимости от места размещения исследуемого объекта. Дополнительно учтена продолжительность солнечного сияния с разбивкой на каждый месяц. Расчет вырабатываемой энергии от солнечной ЭС при ясной погоде в определенный месяц производится по выражению (2.67):

$$P'_i = E_g \cdot N_{i1} \cdot T_i \cdot K_{\text{эф1}}, \quad (2.67)$$

где E_g – вырабатываемая энергия ФЭП, Вт·ч; N_{i1} – количество ясных дней в определенный месяц, сутки; T_i – средняя продолжительность солнечного сияния в определенный месяц, час/сутки; $K_{\text{эф1}}$ – коэффициент эффективности функционирования солнечной ЭС при ясной погоде (принимается, как 1); i – номер определенного месяца, о.е.

Расчет вырабатываемой энергии от солнечных ЭС при облачной погоде в определенный месяц производится по выражению (2.68):

$$P''_i = E_g \cdot N_{i2} \cdot T_i \cdot K_{\text{эф2}}, \quad (2.68)$$

где E_g – вырабатываемая энергия ФЭП, Вт·ч; N_{i2} – количество облачных дней в определенный месяц, сутки; T_i – средняя продолжительность солнечного сияния в

определенный месяц, час/сутки; $K_{эф2}$ – коэффициент эффективности функционирования ФЭП при облачной погоде (принимается, как 0,7); i – номер определенного месяца.

Расчет вырабатываемой энергии от солнечной ЭС при облачной погоде в определенный месяц производится по выражению (2.69):

$$P''_i = E_g \cdot N_{i3} \cdot T_i \cdot K_{эф3}, \quad (2.69)$$

где E_g – вырабатываемая энергия ФЭП, Вт·ч; N_{i3} – количество пасмурных дней в определенный месяц, сутки; T_i – средняя продолжительность солнечного сияния в определенный месяц, час/сутки; $K_{эф3}$ – коэффициент эффективности функционирования ФЭП при пасмурной погоде (принимается, как 0,25); i – номер определенного месяца.

Производится расчет месячной выработанной мощности солнечных ЭС с учетом погодных условий, продолжительности солнечного сияния и др., который выполняется по выражению (2.70):

$$P_{iСЭмесяц} = (P'_i + P''_i + P'''_i) \cdot 10^{-3}, \quad (2.70)$$

где P'_i – выработанная мощность солнечной ЭС при ясной погоде в определенный месяц, кВт·ч; P''_i – выработанная мощность солнечной ЭС при облачной погоде в определенный месяц, кВт·ч; P'''_i – выработанная мощность солнечной ЭС при пасмурной погоде в определенный месяц, Вт·ч; i – номер определенного месяца, о.е.

Производится расчет годовой выработки электроэнергии от солнечной ЭС с учетом внешних факторов по выражению (2.71):

$$P_{СЭгодовая} = \sum_{i=1}^{12} P_{iСЭмесяц}, \quad (2.71)$$

где $P_{iСЭмесяц}$ – суммарная месячная выработка электроэнергии от солнечной ЭС, кВт·ч; i – номер определенного месяца, о.е.

Рассмотрены основные закономерности и методы расчета мощности функционирования ФЭП на сутки, месяцы и годы с учетом ввода начальных условий модели: наименование населенного пункта; тип ФЭП; геометрические и технические характеристики ФЭП; среднемесячная солнечная инсоляция; среднесуточная солнечная радиация в определенной локации; потери на функционирование системы накопления энергии, контроллеров заряда и силового инвертора; коэффициенты эффективности функционирования ФЭП при различных погодных условиях; продолжительность солнечного сияния в конкретном периоде эксплуатации; угол наклона ФЭП в зимний период – $80...90^{\circ}$, весенний – $60...80^{\circ}$, летний – $30...50^{\circ}$ и осенний – $50...80^{\circ}$. Внешние условия подбираются в автоматизированном режиме в зависимости от места размещения исследованного объекта.

2.14 Модель расчета параметров технико-экономического обоснования солнечной электростанции

Представлены ключевые закономерности вычисления технико-экономических показателей функционирования солнечной ЭС. Методика расчета технико-экономических параметров направлена на вычисление объема потребления ГСМ в автономных энергосистемах на удаленных территориях Севера. При процедурах вычисления данных показателей идентифицируются следующие параметры: объем экономии топлива, т.н.т.; объем экономии топлива в денежном эквиваленте, тыс. рублей; амортизационные отчисления, тыс. руб/год; срок окупаемости, лет; срок окупаемости с учетом ставки дисконта, лет.

Расчет объема уменьшения потребления топлива выполняется по выражению (2.72):

$$M_{\text{годовое}}^{\text{э}} = P'_{\text{ВИЭ}} \cdot U \cdot 10^{-3}, \quad (2.72)$$

где $P'_{\text{ВИЭ}}$ – годовая выработка электроэнергии от ВИЭ, кВт·ч; U – удельный расход дизельного топлива, гр./кВт·ч.

Расчет объема уменьшения потребления топлива в денежном эквиваленте выполняется по выражению (2.73):

$$\mathcal{E}_{\text{годовой}} = M_{\text{годовой}}^{\mathcal{E}} \cdot C_m \cdot 10^{-3}, \quad (2.73)$$

где $M_{\text{годовой}}^{\mathcal{E}}$ – доля уменьшения потребления топлива, кг.; C_m – стоимость дизельного топлива, тыс. рублей/т.

Расчет амортизационных отчислений выполняется по выражению (2.74):

$$A = \frac{K}{T}, \quad (2.74)$$

где K – капитальные затраты на приобретение оборудования и строительства солнечной ЭС, тыс. руб; T – допустимый срок службы солнечной ЭС, лет.

Расчет срока окупаемости выполняется по выражению (2.75):

$$PP = \frac{K}{\mathcal{E}_{\text{годовой}} - A}, \quad (2.75)$$

где K – капитальные затраты на приобретение оборудования и строительство солнечной ЭС, тыс. руб; $\mathcal{E}_{\text{годовой}}$ – денежный эквивалент доли уменьшения потребления топлива, тыс. рублей; A – амортизационные отчисления, тыс. руб/год.

Расчет срока окупаемости с учетом ставки дисконтирования выполняется по выражению (2.76):

$$DPP = \left(\sum_{t=1}^n \frac{(\mathcal{E}_{\text{годовой}} - A)}{(1+r)^t} \right) - K, \quad (2.76)$$

где $\mathcal{E}_{\text{годовой}}$ – денежный эквивалент доли уменьшения потребления топлива, тыс. рублей; A – амортизационные отчисления, тыс. руб/год; r – ставка дисконтирования, о.е (принимается как 0,04); K – капитальные затраты на приобретение оборудования и строительства солнечной ЭС, тыс. руб.

Выводы по второй главе

1. Определен перечень внешних факторов Севера, влияющих на функционирование солнечных электростанций и их взаимосвязи, с разделением на два уровня. Сформирована совокупность закономерностей по вычислению

характера и показателей влияния данных факторов на режимы работы солнечных электростанций.

2. Исследованы модели расчета рабочих параметров функционирования элементов типовой автономной энергосистемы, такие как: выработка электроэнергии; преобразование/трансформация электроэнергии; передача/транспортировка электроэнергии.

3. Рассмотрена существующая методика расчета рабочих параметров солнечных электростанций, позволяющая определить ее режим работы в условиях снижения выработки электроэнергии. Данный факт может быть вызван негативным влиянием внешних факторов. Представленную методику необходимо дополнить показателями влияния внешних факторов Севера для получения обновленной методики расчета рабочих параметров солнечных электростанций.

4. Дополненная методика расчета рабочих параметров солнечных электростанций, разработанная на основе совокупности методик расчета режимов работы, выработки электроэнергии и технико-экономических показателей, позволяет повысить достоверность результатов расчета параметров их функционирования к фактическим значениям за счет дополнительного учета исследуемых факторов.

ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА

3.1 Постановка задачи

В настоящей главе представлено подробное описание места и условий проведения натурных исследований в целях идентификации характера и показателей влияния внешних факторов Севера на выработку электроэнергии от солнечной ЭС. Разработаны алгоритмы и порядок выполнения натурных исследований по изучению характера и показателей влияния внешних факторов из ранее сформированного перечня. Разработанные алгоритмы и порядок выполнения исследований соответствуют ключевым требованиям теории планирования экспериментальных исследований.

Предполагается оценка характера и показателей влияния ключевых внешних факторов Севера на выработку электроэнергии и режимы работы солнечной ЭС. Будут разработаны новые способы защиты или профилактики, направленные на уменьшение негативного влияния внешних факторов Севера на функционирование солнечной ЭС в составе автономной энергосистемы. Данные способы будут иметь прикладной характер с максимально облегченной процедурой применения в солнечных ЭС малой мощности.

3.2 Характер влияния внешних факторов на функционирование солнечной электростанции

Ключевыми внешними факторами, влияющими на функционирование солнечной ЭС, являются (Рисунок 2.8): солнечное излучение; поверхностная температура ФЭП; поверхностное загрязнение ФЭП. Характер влияния солнечного излучения на функционирование ФЭП представлен на рисунке 3.1.

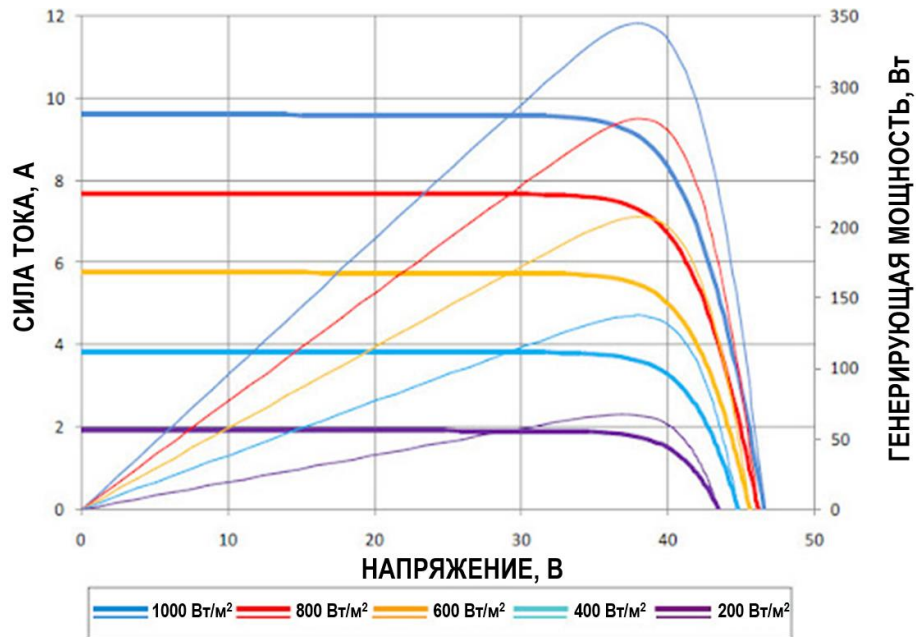


Рисунок 3.1 – Типовая вольтамперная характеристика фотоэлектрической панели

Ключевым внешним фактором, влияющим на выработку мощности электроэнергии от ФЭП, является солнечное излучение вследствие прямого преобразования энергии солнечного излучения в электрическую энергию. С уменьшением солнечного излучения снижается величина тока и напряжения ФЭП. Солнечное излучение зависит от характера влияния следующих подфакторов: вид облачности, задымление окружающей среды, вызванное лесными пожарами; и др. Учет данных подфакторов необходим для увеличения достоверности имитационных расчетов и моделирования рабочих режимов солнечной ЭС, в том числе оценки ее энергетического потенциала (§2.7).

Существуют исследования в области идентификации характера влияния изменения поверхностной температуры ФЭП на режимы работы солнечной ЭС [10, 86, 118, 145, 164, 203] с изучением ее тепловой модели (§2.9), но отсутствуют результаты натурных исследований, проведенных в климатических условиях Севера, по данному направлению.

Выполнение натурных исследований по идентификации характера влияния поверхностной температуры ФЭП на ее рабочие режимы на территории Севера является необходимой мерой по исследованию характера ее влияния и увеличения степени достоверности имитационных расчетов показателей функционирования

солнечной ЭС. Поверхностная температура ФЭП зависит от следующих внешних подфакторов: солнечное излучение, влажность окружающей среды, скорость ветра и температура окружающей среды (Рисунок 2.8).

При эксплуатации солнечной ЭС необходимо производить периодическую очистку поверхности ФЭП от загрязнения [7, 9, 12, 19, 161, 183], образование которого вызвано наличием мелкодисперсных фракций пыли размером от 1 мкм, снегового покрова, комбинированного состава мелкодисперсных фракций пыли и снегового покрова; комбинированного состава мелкодисперсных фракций пыли и влаги в полужидком виде на фоне атмосферных осадков.

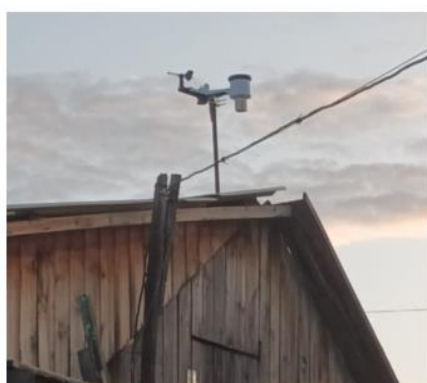
Существуют различные способы защиты и профилактики ФЭП от негативного влияния поверхностного загрязнения [2, 8, 107, 126], но данный фактор практически не учитывается при выполнении имитационных расчетов, моделировании рабочих режимов и оценки энергетического потенциала солнечных ЭС. В этой связи выполнение исследований по идентификации характера влияния поверхностного загрязнения на рабочие режимы солнечной ЭС является необходимой мерой для получения точных результатов в ходе выполнения имитационных расчетов.

В связи с этим выполнение исследований по идентификации характера влияния различных внешних факторов на рабочие режимы функционирования солнечной ЭС на территории Севера является необходимой мерой по повышению достоверности при проведении расчетов ее режима работы.

3.3 Условия проведения натуральных исследований

Натурные исследования по идентификации характера влияния внешних факторов на выработку электроэнергии и режимов работы солнечной ЭС выполнены на базе полигона в центральной части РС(Я) в рамках выполнения государственного задания по проекту 0297–2021–0013 «Исследования путей повышения эксплуатационной надежности и эффективности интеллектуальных электроэнергетических систем в условиях Севера и Арктики» №121032200059–7

по направлению «Основы эффективного развития и функционирования энергетических систем и рационального освоения природных энергоресурсов». При выполнении данных исследований применялся следующий перечень исследовательского оборудования: солнечная ЭС установленной мощностью 2кВт; климатическая станция (Рисунок 3.2а); трекерная установка с ФЭП (Рисунок 3.2б); ФЭП линейки мощностей: 10...300 Вт (Рисунок 3.2в); контроллер заряда с функцией передачи данных; АКБ; вспомогательная и основная нагрузка; программное обеспечение для обработки данных натурных исследований.



а)



б)



в)

Рисунок 3.2 – Внешние виды исследовательского оборудования:

а) климатическая станция; б) трекерная установка; в) панель зимой

Место выполнения натурных исследований имеет следующие климатические параметры: продолжительность солнечного сияния – до 2400 час/год; среднесуточная сумма солнечной радиации в период проведения натурных исследований – 4,0...4,5 кВт·ч/м²; летний температурный максимум – +38 °С; зимний температурный минимум – –62 °С; среднесуточная продолжительность светового дня – 6,5 часов.

На рисунке 3.3 представлена общая схема соединения исследуемой солнечной ЭС, трекерной установки, измерительно-регистрирующих приборов, климатической станции и др.

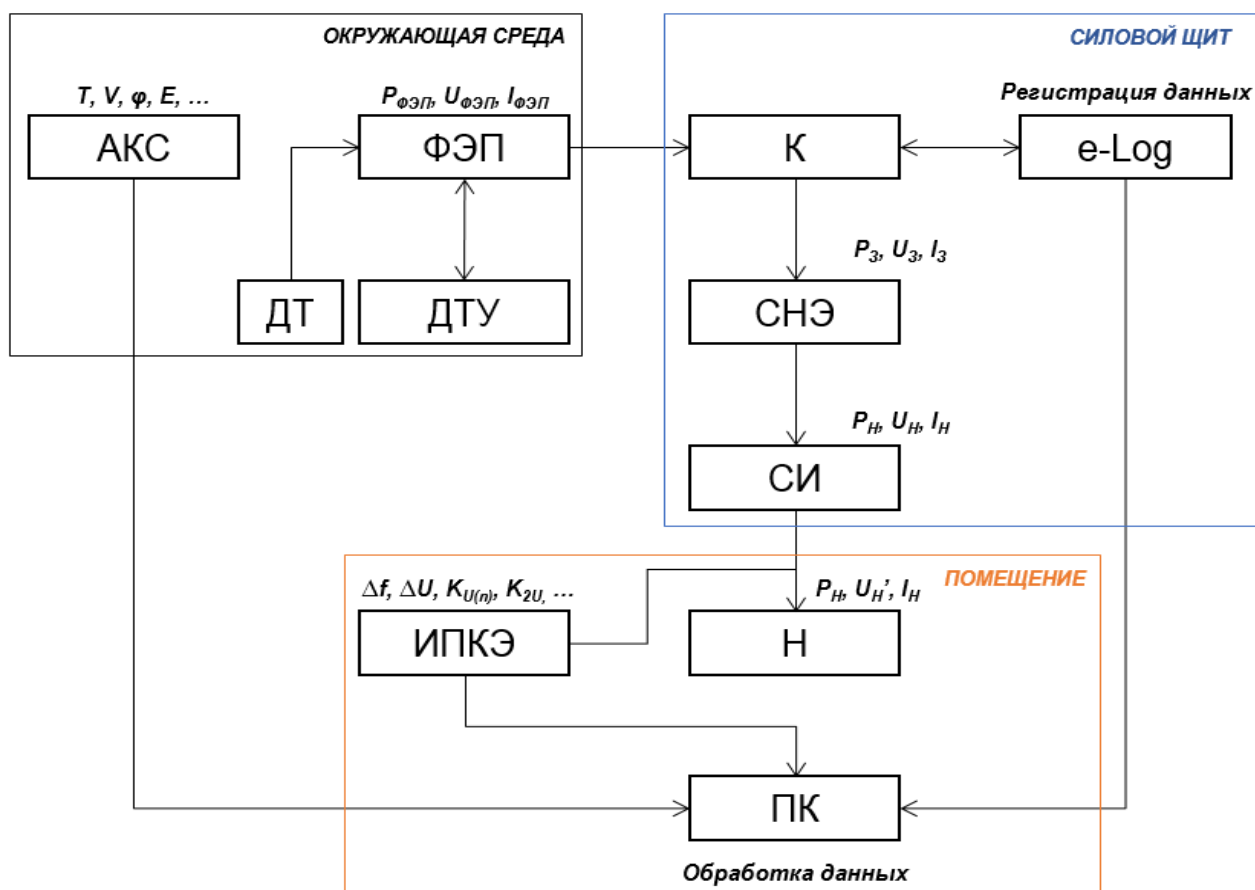


Рисунок 3.3 – Структурная схема исследуемой солнечной электростанции с вспомогательным оборудованием: КС – климатическая станция; ДТ – датчик температуры на поверхности ФЭП; ДТУ – трекерная установка; ФЭП – фотоэлектрическая панель; К – контроллер заряда; СНЭ – система накопления энергии; СИ – силовой инвертор; Н – нагрузка; ИПКЭ – измеритель показателей качества электроэнергии; ПК – персональный компьютер для обработки данных; e-Log – регистратор электроэнергетических показателей работы

Вышеуказанная схема имеет следующий технологический цикл: ФЭП генерируют электроэнергию посредством преобразования энергии солнечного излучения; на поверхности ФЭП устанавливаются датчики температуры (ДТ) для измерения и регистрации поверхностной температуры; ФЭП закрепляются на двухосевую трекерную установку (ДТУ) для увеличения выработки электроэнергии; сгенерированная электроэнергия направляется к силовому инвертору (СИ) для преобразования напряжения в пределах 198...242 В через контроллер (К), распределяющий электроэнергию в систему накопления энергии

(СНЭ); в ходе потребления электроэнергии к стороне нагрузки (Н) подключается измеритель показателей качества электроэнергии (ИПКЭ) для измерения и регистрации данных параметров; автономная климатическая станция (АКС) выполняет измерение и регистрацию климатических параметров; выполняется обработка экспериментальных данных посредством применения персонального компьютера (ПК) и лицензированных программных комплексов «EPEVER» и «ECOWITT».

3.4 Исследование характера влияния поверхностного загрязнения на функционирование солнечной электростанции

3.4.1 Исследование характера влияния мелкодисперсных фракций пыли на функционирование солнечной электростанции

Представлены результаты натурных исследований по идентификации характера влияния мелкодисперсных фракций пыли на выработку электроэнергии и режимов работы солнечной ЭС. Загрязнение поверхности ФЭП солнечной ЭС образовывается по причине влияния мелкодисперсных фракций пыли. Период негативного влияния фракций пыли на функционирование солнечных ЭС в климатических условиях Севера – это «апрель...сентябрь». По теории планирования экспериментальных исследований [3, 56, 68, 81, 157, 178] идентифицированы необходимое количество опытов и формула определения характера влияния мелкодисперсных фракций пыли на выработку электроэнергии от солнечной ЭС по выражениям (3.1) – (3.2):

$$N = P^K = 2^3 = 8 \quad (3.1)$$

где N – количество опытов, ед.; P – число уровней каждого фактора, ед.; K – число факторов, ед. Число уровней каждого фактора – 2, число факторов – 3.

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathcal{E}_{\text{чистый}}^{\text{сутки}} = \int_0^{24} \mathcal{E}_{\text{чистый}}^{\text{ФЭП}}(t) dt \\ \mathcal{E}_{\text{пыль}}^{\text{сутки}} = \int_0^{24} \mathcal{E}_{\text{пыль}}^{\text{ФЭП}}(t) dt \\ \sum \mathcal{E}_{\text{чистый}}^{\text{месяц}} = \sum_{i=1}^{30} \mathcal{E}_{i.\text{чистый}}^{\text{сутки}} , \\ \sum \mathcal{E}_{\text{пыль}}^{\text{месяц}} = \sum_{i=1}^{31} \mathcal{E}_{i.\text{пыль}}^{\text{сутки}} \\ \Delta_{\text{пыль}} = \frac{\sum \mathcal{E}_{\text{пыль}}^{\text{месяц}}}{\sum \mathcal{E}_{\text{чистый}}^{\text{месяц}}} \end{array} \right. , \quad (3.2)$$

где $\mathcal{E}_{\text{чистый}}^{\text{ФЭП}}$ – мгновенная мощность ФЭП с чистой поверхностью, Вт; $\mathcal{E}_{\text{чистый}}^{\text{сутки}}$ – среднесуточная выработка электроэнергии от ФЭП с чистой поверхностью, Вт·ч; $\mathcal{E}_{\text{пыль}}^{\text{ФЭП}}$ – мгновенная мощность ФЭП с запыленной поверхностью, Вт; $\mathcal{E}_{\text{пыль}}^{\text{сутки}}$ – среднесуточная выработка электроэнергии от ФЭП с запыленной поверхностью, Вт·ч; $\sum \mathcal{E}_{\text{чистый}}^{\text{месяц}}$ – среднемесячная выработка электроэнергии от ФЭП с чистой поверхностью, Вт·ч; $\sum \mathcal{E}_{\text{пыль}}^{\text{месяц}}$ – среднемесячная выработка электроэнергии от ФЭП с запыленной поверхностью, Вт·ч; $\Delta_{\text{пыль}}$ – доля среднестатистического снижения выработки электроэнергии от ФЭП от мелкодисперсных фракций пыли (дополняющий коэффициент), о.е.; t – период исследования, ч.; i – порядковый номер суток мониторинга, сутки.

Натурные исследования по идентификации характера влияния мелкодисперсных фракций пыли на функционирование солнечной ЭС выполнены по следующему алгоритму, представленному на рисунке 3.4. В ходе выполнения исследований применены два вида ФЭП: поликристаллический со стеклянной поверхностью и гибкий монокристаллический с полимерной поверхностью. Поверхности ФЭП отсканированы на предмет наличия отклонения поверхности путем применения профилометра (Рисунок 3.5). Среднестатистическое отклонение поверхности поликристаллической ФЭП составило 3 мкм с максимальным отклонением – 6,3 мкм, а для монокристаллической ФЭП – до 4 мкм с максимальным отклонением до 9,8 мкм [86, 88].

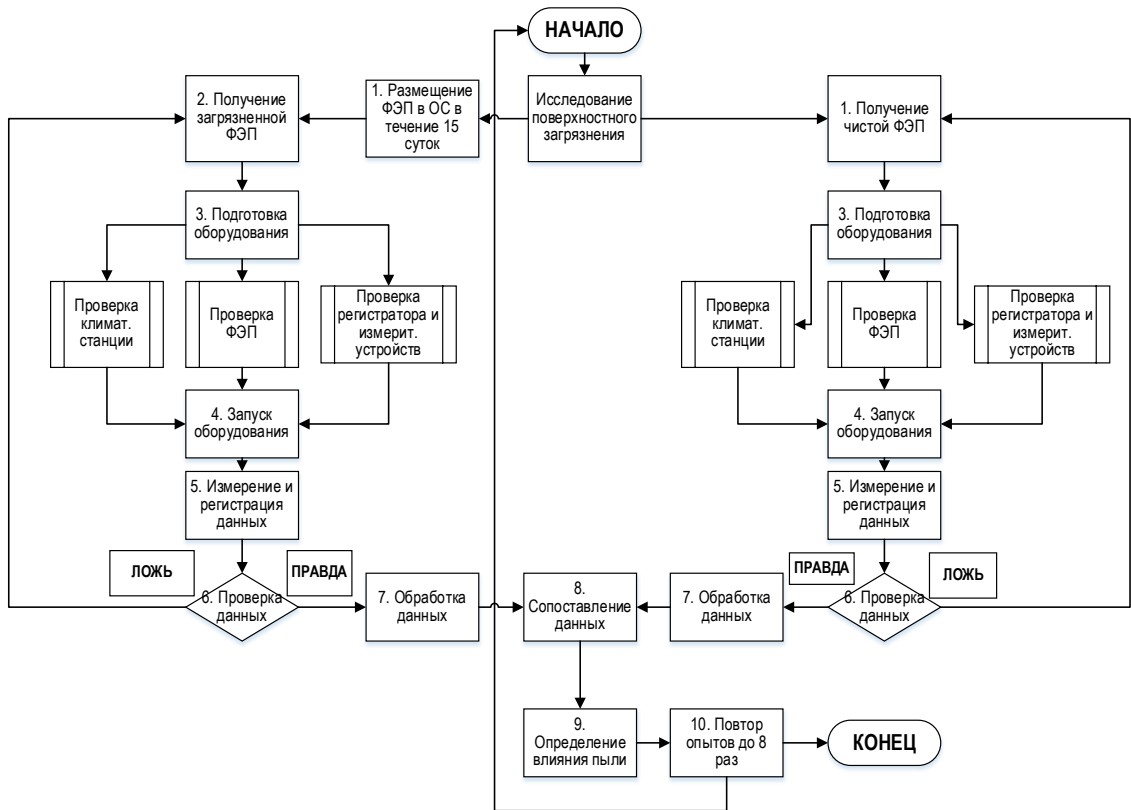


Рисунок 3.4 – Блок-схема алгоритма натуральных исследований

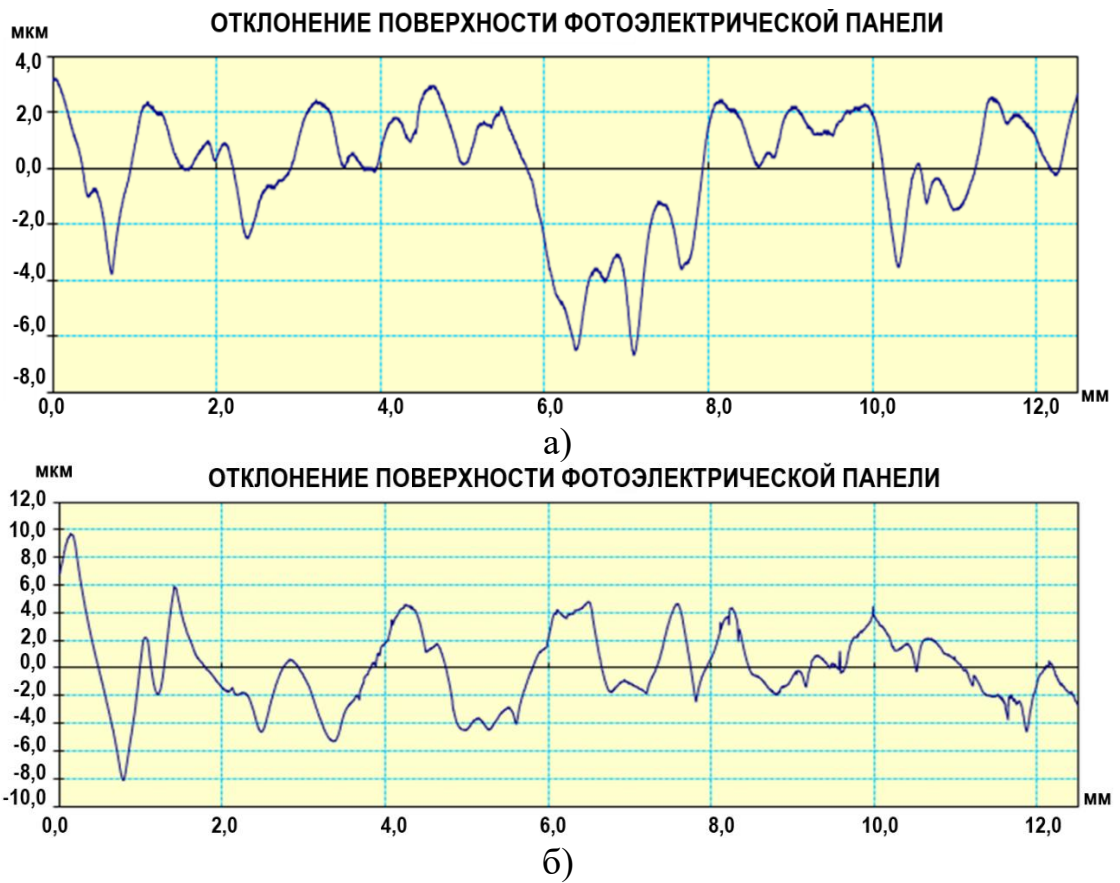


Рисунок 3.5 – Результаты сканирования поверхности фотоэлектрической панели:
а) стеклянная поверхность; б) полимерная поверхность

На рисунке 3.6 представлены внешние виды поверхностей исследуемых ФЭП до и после влияния поверхностного загрязнения. Исследование функционирования ФЭП проведено с повторностью экспериментов до 8 ед. по размещению панелей в условиях окружающей среды в течение 15 суток, где на рисунках 3.7, 3.8 представлены результаты изучения поверхности ФЭП на наличие мелкодисперсных фракций пыли и их среднестатистические показатели генерирующей мощности.

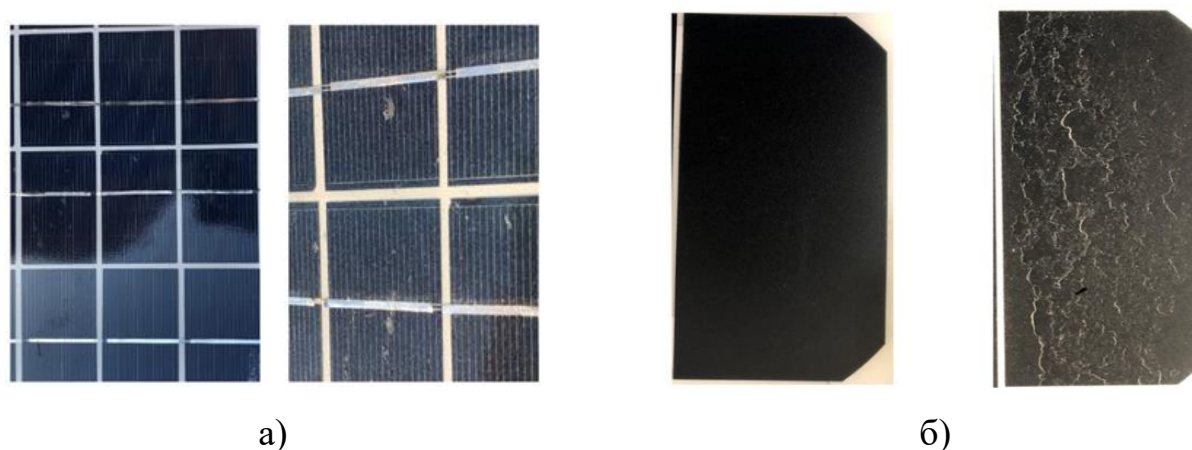


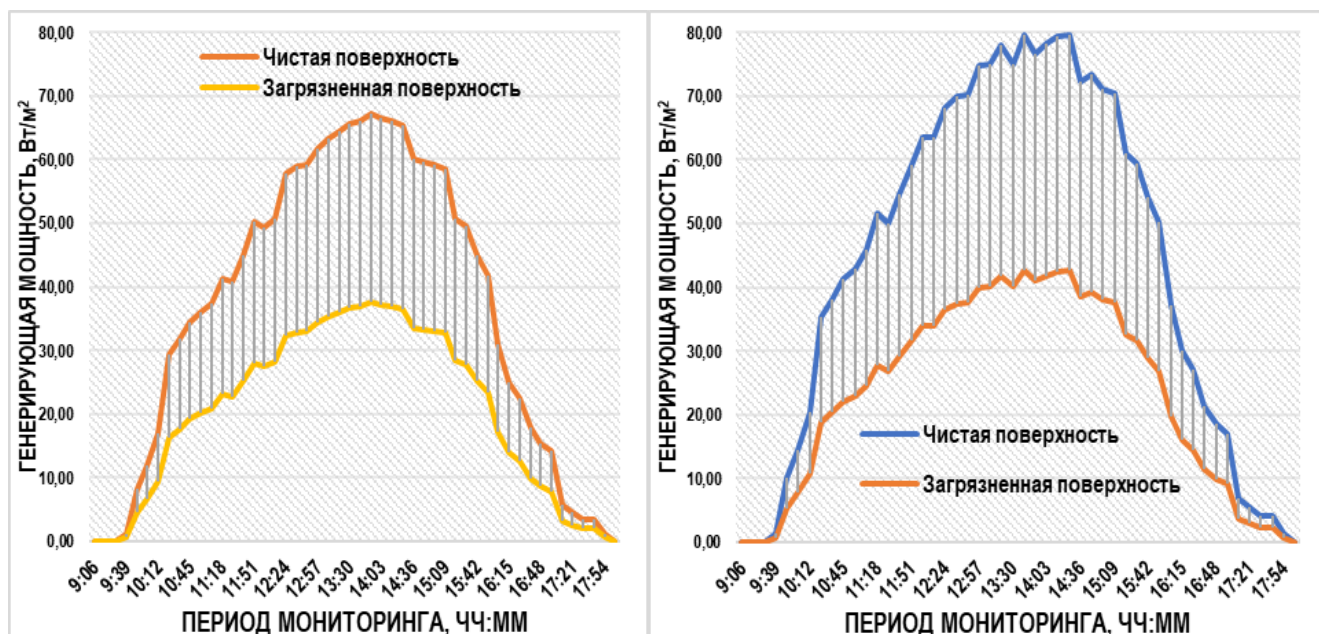
Рисунок 3.6 – Внешние виды поверхностей фотоэлектрических панелей:
а) поликристаллическая; б) монокристаллическая



а) б)

Рисунок 3.7 – Результаты сканирования внутренней структуры поверхностного загрязнения фотоэлектрической панели:

а) поликристаллическая; б) монокристаллическая



а)

б)

Рисунок 3.8 – График выработки электроэнергии от фотоэлектрической панели:
а) поликристаллическая; б) монокристаллическая

По причине наличия поверхностного загрязнения ФЭП уменьшается генерирующая мощность и ухудшаются режимы работы солнечной ЭС. Преобладание генерирующей мощности монокристаллической ФЭП объясняется ее высоким КПД (до 22%) при сравнении с меньшим КПД (до 16%) поликристаллической ФЭП. Произведен расчет показателя снижения генерирующей мощности ФЭП (моно– и поли–), где в таблицах 3.1, 3.2 представлены результаты данного расчета и показатели сканирования поверхности панелей [105]. Исследование выполнено с применением одинаковых ФЭП с загрязненными и очищенными поверхностями при одинаковых климатических условиях.

Таблица 3.1 – Фотоэлектрические панели при загрязнении пылью [105]

№	Наименование параметра	СИ	ФЭП (монокристалл)	ФЭП (поликристалл)
1.	Вид материала поверхности панели	–	Полимер	Стекло
2.	Среднее отклонение поверхности панели	мкм	≤4,0	≤3,0

№	Наименование параметра	СИ	ФЭП (монокристалл)	ФЭП (поликристалл)
3.	Максимальное отклонение поверхности панели	мкм	$\leq 9,8$	$\leq 6,3$
4.	Размеры пылевых фракций поверхностного загрязнения	мкм	2,06...7,90	1,25...4,75
5.	Выработанная мощность с чистой поверхностью	Вт·ч/м ²	400,66 ± 3,23%	333,54 ± 3,23%
6.	Выработанная мощность с загрязненной поверхностью	Вт·ч/м ²	214,19 ± 3,23%	186,28 ± 3,23%
7.	Снижение генерирующей мощности	%	46,54	44,15

Таблица 3.2 – Показатели снижения выработки солнечной электростанции при загрязнении пылью

№	Наименование параметра	5-й день	10-й день	15-й день
1.	Снижение генерирующей мощности, %	7,5	24,6	46,5
2.	Общий недоотпуск электроэнергии, %	3,75	10,75	19,75

На рисунках 3.9, 3.10 представлены результаты исследования функционирования ФЭП при различных степенях поверхностного загрязнения. В таблице 3.2 представлены результаты анализа выработки электроэнергии от солнечной ЭС в условиях влияния поверхностного загрязнения ФЭП, вызванного образованием слоя из мелкодисперсных фракций пыли.

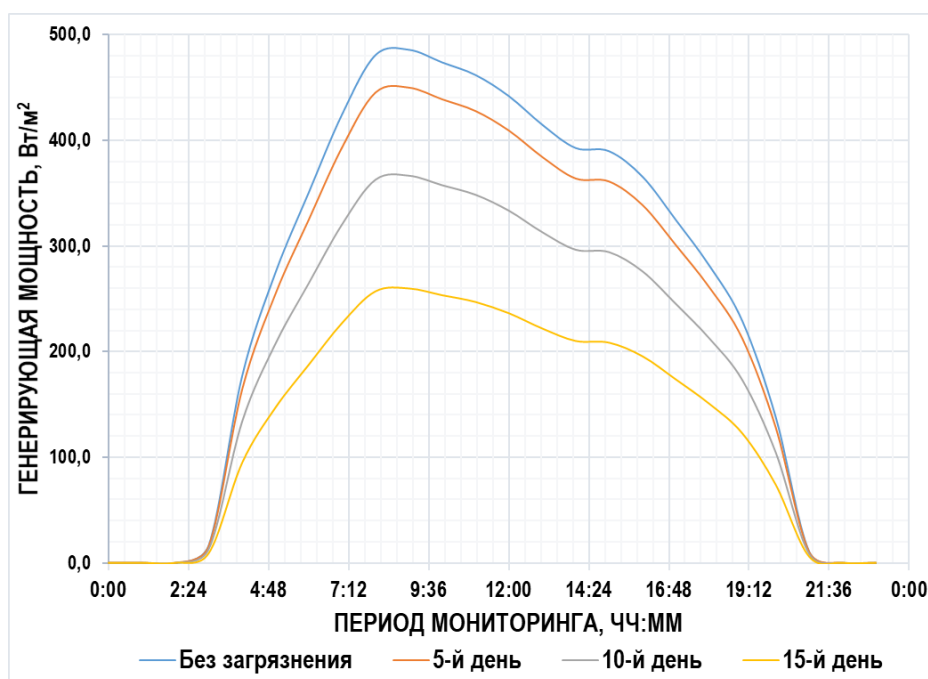


Рисунок 3.9 – Суточный график выработки электроэнергии от солнечной электростанции при загрязнении мелкодисперсными фракциями пыли

Зафиксировано значительное уменьшение генерирующей мощности ФЭП. Размещение ФЭП в запыленной сельской местности вызвало значительное снижение генерирующей мощности ФЭП на 46,54%.

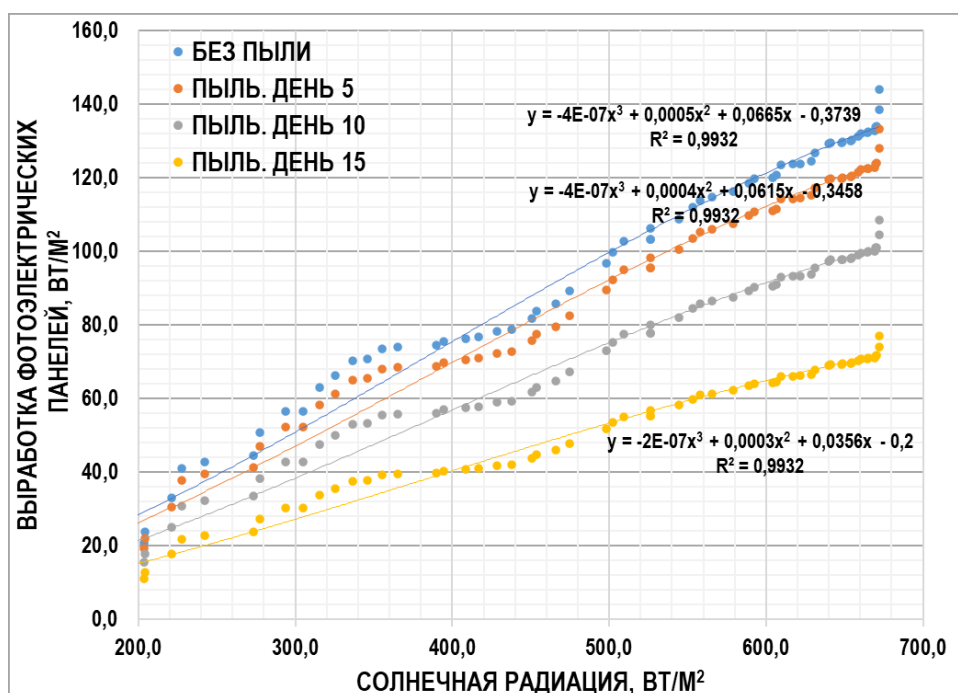
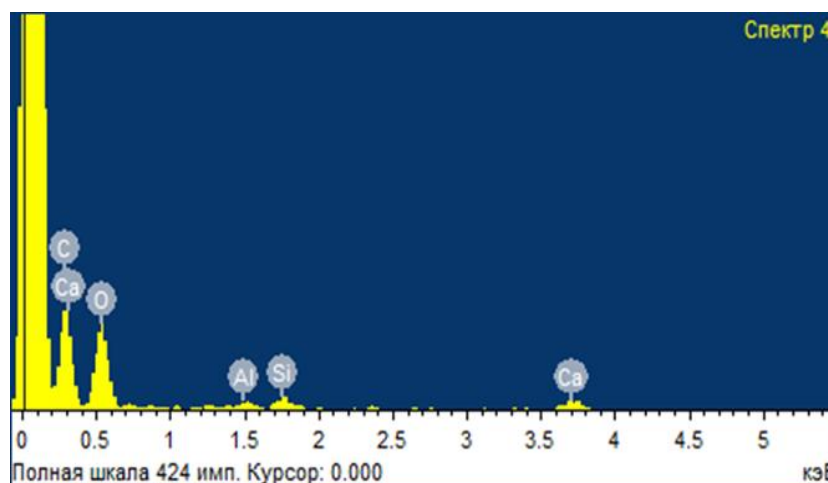


Рисунок 3.10 – Выработка от солнечной электростанции при загрязнении мелкодисперсными фракциями пыли

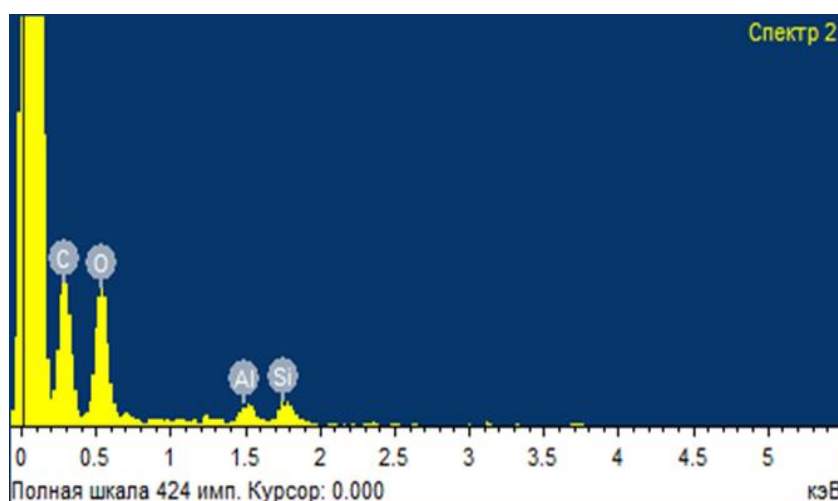
Выполнен химический анализ поверхностного загрязнения на ФЭП посредством применения электронного микроскопа JEOL JSM 7800F и программного обеспечения OXFORD INSTRUMENTS. На рисунке 3.11 представлены графические интерпретации спектрального анализа поверхностного загрязнения.

В спектре 1 поверхностного загрязнения имеются частицы углерода (C) с концентрацией 47,27% на 1 а.е.м, кислорода (O₂) с концентрацией 43,32% на 1 а.е.м, алюминия (Al) с концентрацией 4,08% на 1 а.е.м и кремния (Si) с концентрацией 5,33% на 1 а.е.м. Во 2–м спектре поверхностного загрязнения имеются частицы углерода (C) с концентрацией 37,53% на 1 а.е.м, кислорода (O₂) с концентрацией 40,50% на 1 а.е.м, алюминия (Al) с концентрацией 1,65% на 1 а.е.м, кремния (Si) с концентрацией 3,29% на 1 а.е.м, кальция (Ca) с концентрацией 16,95% на 1 а.е.м. Наличие алюминия, кремния и кальция объясняет, что поверхностное загрязнение состоит из мелкодисперсных фракций пыли. Наличие значительной концентрации

углерода и кислорода объяснено тем, что поверхность монокристаллической ФЭП имеет полимерный состав.



а)



б)

Рисунок 3.11 – Результаты анализа частиц поверхностного загрязнения:

а) спектр I; б) спектр II

В рамках определения достоверности гипотезы уменьшения генерирующей мощности ФЭП и ухудшения режимов работы солнечной ЭС по причине негативного влияния мелкодисперсных фракций пыли выполнен расчет t–критерия Стьюдента (Выражения (3.3) – (3.5)). Период исследования аналогичной ФЭП с загрязненной и чистой поверхностью – 09:00...18:00 часов после полуночи в течение активной фазы светового дня (9 часов). Период шага исследования – ≤ 12 минут. Количество шагов исследования определено по выражению (3.3):

$$N = \frac{T}{K} = \frac{540}{12} = 45, \quad (3.3)$$

где N – количество шагов исследования, ед.; T – общий период исследования, 9ч. = 540 мин; K – период шага исследования, 12 мин.

Число степеней свободы [29, 110–111, 151] определено по выражению (3.4):

$$\partial f = (N_1 + N_2) - j = (46 + 46) - 2 = 90, \quad (3.4)$$

где ∂f – число степеней свободы, ед.; N_1 – количество измерений в случае с чистой ФЭП (число выборки), 46 ед.; N_2 – количество измерений в случае с загрязненной ФЭП (число выборки), 46 ед.; j – количество видов выборки, 2 ед.

Расчет окончательного значения t -критерия Стьюдента [29, 110, 111, 151] производится по алгоритму, представленному на рисунке 3.12.

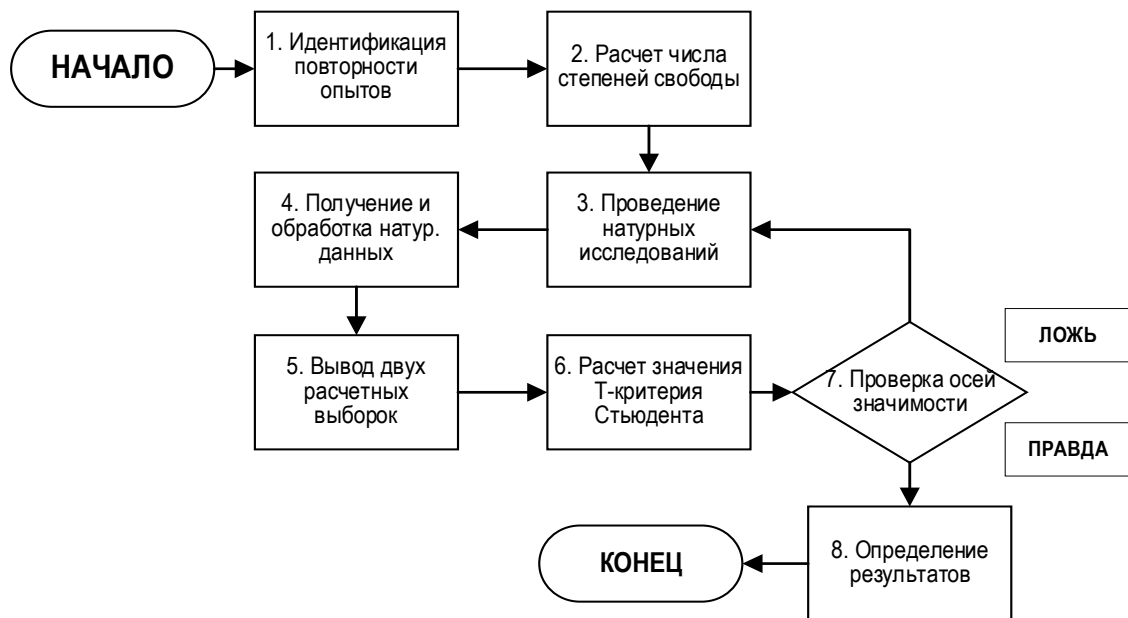


Рисунок 3.12 – Алгоритм идентификации значения t -критерия Стьюдента

$$t_{кр} = \frac{|\bar{X}_1 - \bar{X}_2|}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{N_1} + \frac{\sigma_2^2}{N_2}}}, \quad (3.5)$$

где $t_{кр}$ – критерий Стьюдента, о.е.; \bar{X}_1 – среднеарифметическое значение 1-й выборки, о.е.; \bar{X}_2 – среднеарифметическое значение 2-й выборки, о.е.; σ_1^2 – стандартное отклонение 1-й выборки; σ_2^2 – стандартное отклонение 2-й выборки; N_1 – суммарное количество шагов 1-й выборки, о.е.; N_2 – суммарное количество шагов 2-й выборки, о.е.

В таблице 3.3 и на рисунке 4.7 представлены результаты обработки данных. В Приложении В (Таблица В.1) указаны детали данных расчетов.

Таблица 3.3 – Результаты обработки экспериментальных данных

№	Наименование параметра	В.1 $P_{\text{чист}}, \text{Вт/м}^2$	В.2 $P_{\text{загр.}}, \text{Вт/м}^2$
1.	Среднеарифметическое значение	39,48	22,05
2.	Медиана	43,44	24,26
3.	Среднее отклонение	-0,07	-0,08
4.	T–критерий Стьюдента (T_{kr})	4,7	
Определение погрешности измерений			
5.	Средняя погрешность измерений, %	3,21	1,79
6.	Систематическая погрешность измерительных приборов, %	2,0	2,0
7.	Полная погрешность, %	3,78	2,69

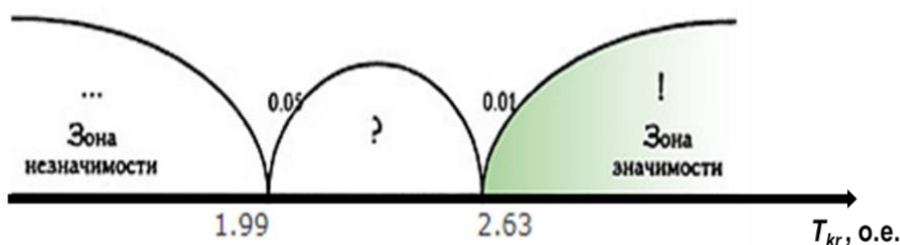


Рисунок 3.13 – Ось значимости гипотезы

T–критерий Стьюдента со значением 4,7 находится на промежутке уровня значимости $p \leq 0.01$ ($T_{kr} > 2,63$), тем самым, данный критерий находится в зоне значимости, объясняя достоверность гипотезы снижения генерирующей мощности ФЭП по причине негативного влияния мелкодисперсных фракций пыли.

3.4.2 Исследование характера влияния снегового покрова на функционирование солнечной электростанции

Представлены результаты натурных исследований по идентификации характера влияния снегового покрова на выработку электроэнергии и режимов работы солнечной ЭС. Загрязнение поверхности ФЭП образовывается вследствие влияния снегового покрова. Период влияния данного подфактора на солнечные ЭС на территории Севера – октябрь...апрель.

В соответствии с теорией планирования экспериментальных исследований определено необходимое количество опытов для установления влияния снегового покрова на функционирование ФЭП по выражению (3.6):

$$N = P^K = 2^3 = 8, \quad (3.6)$$

где N – количество опытов, ед.; P – число уровней каждого фактора, ед.; K – число факторов, ед. Число уровней каждого фактора – 2, число факторов – 3 (Рисунок 2.8).

Натурные исследования по идентификации характера влияния поверхностного загрязнения – снегового покрова на выработку электроэнергии солнечной ЭС выполнены по алгоритму, который представлен на рисунке 3.14. Для проведения натурных исследований применены ФЭП солнечной ЭС. Исследование функционирования ФЭП проведено в течение зимнего периода с повторностью экспериментов до 8 ед. в условиях окружающей среды в течение 30 суток. На рисунках 3.15, 3.16, 3.17 представлены внешние виды ФЭП и график их выработки описан в виде выражения (3.7).

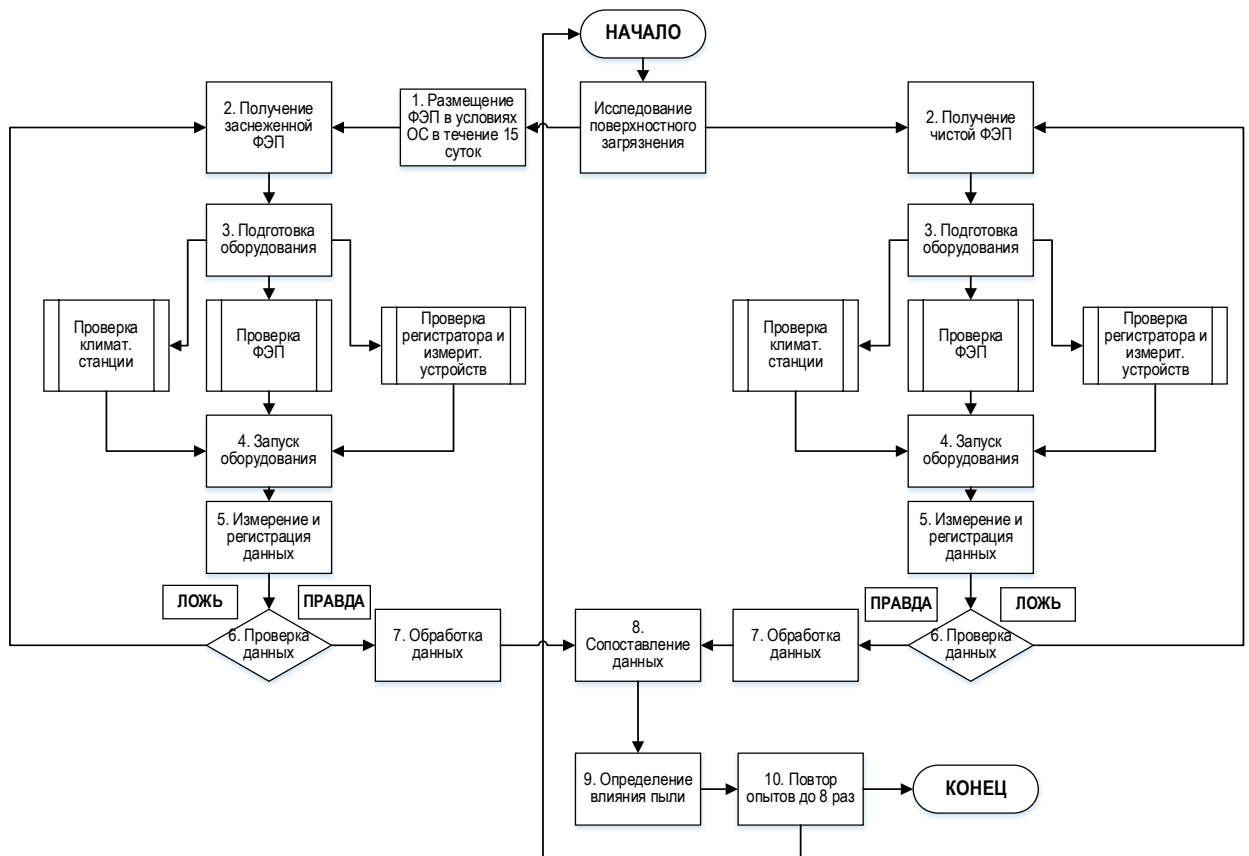
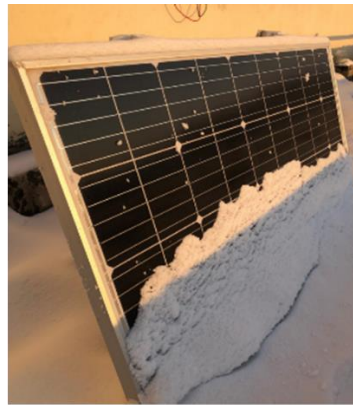


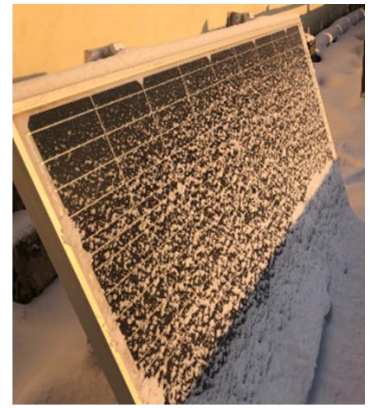
Рисунок 3.14 – Блок-схема алгоритма натурных исследований



1-й ДЕНЬ



14-й ДЕНЬ



28-й ДЕНЬ

Рисунок 3.15 – Внешние виды фотоэлектрической панели при мониторинге

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathcal{E}_{\text{чистый}}^{\text{сутки}} = \int_0^{24} \mathcal{E}_{\text{чистый}}^{\text{ФЭП}}(t) dt \\ \mathcal{E}_{\text{снег}}^{\text{сутки}} = \int_0^{24} \mathcal{E}_{\text{снег}}^{\text{ФЭП}}(t) dt \\ \sum \mathcal{E}_{\text{чистый}}^{\text{месяц}} = \sum_{i=1}^{30} \mathcal{E}_{i.\text{чистый}}^{\text{сутки}}, \\ \sum \mathcal{E}_{\text{снег}}^{\text{месяц}} = \sum_{i=1}^{31} \mathcal{E}_{i.\text{снег}}^{\text{сутки}} \\ \Delta_{\text{снег}} = \frac{\sum \mathcal{E}_{\text{снег}}^{\text{месяц}}}{\sum \mathcal{E}_{\text{чистый}}^{\text{месяц}}} \end{array} \right. , \quad (3.7)$$

где $\mathcal{E}_{\text{чистый}}^{\text{ФЭП}}$ – мгновенная мощность ФЭП с чистой поверхностью, Вт; $\mathcal{E}_{\text{чистый}}^{\text{сутки}}$ – среднесуточная выработка электроэнергии от ФЭП с чистой поверхностью, Вт·ч; $\mathcal{E}_{\text{снег}}^{\text{ФЭП}}$ – мгновенная мощность ФЭП со снежной поверхностью, Вт; $\mathcal{E}_{\text{снег}}^{\text{сутки}}$ – среднесуточная выработка электроэнергии от ФЭП со снежной поверхностью, Вт·ч; $\sum \mathcal{E}_{\text{чистый}}^{\text{месяц}}$ – среднемесячная выработка электроэнергии от ФЭП с чистой поверхностью, Вт·ч; $\sum \mathcal{E}_{\text{снег}}^{\text{месяц}}$ – среднемесячная выработка электроэнергии от ФЭП со снежной поверхностью, Вт·ч; $\Delta_{\text{снег}}$ – доля среднестатистического снижения выработки электроэнергии от ФЭП при снеговом покрове (дополняющий коэффициент), о.е.; t – период исследования, ч.; i – порядковый номер суток мониторинга, сутки.

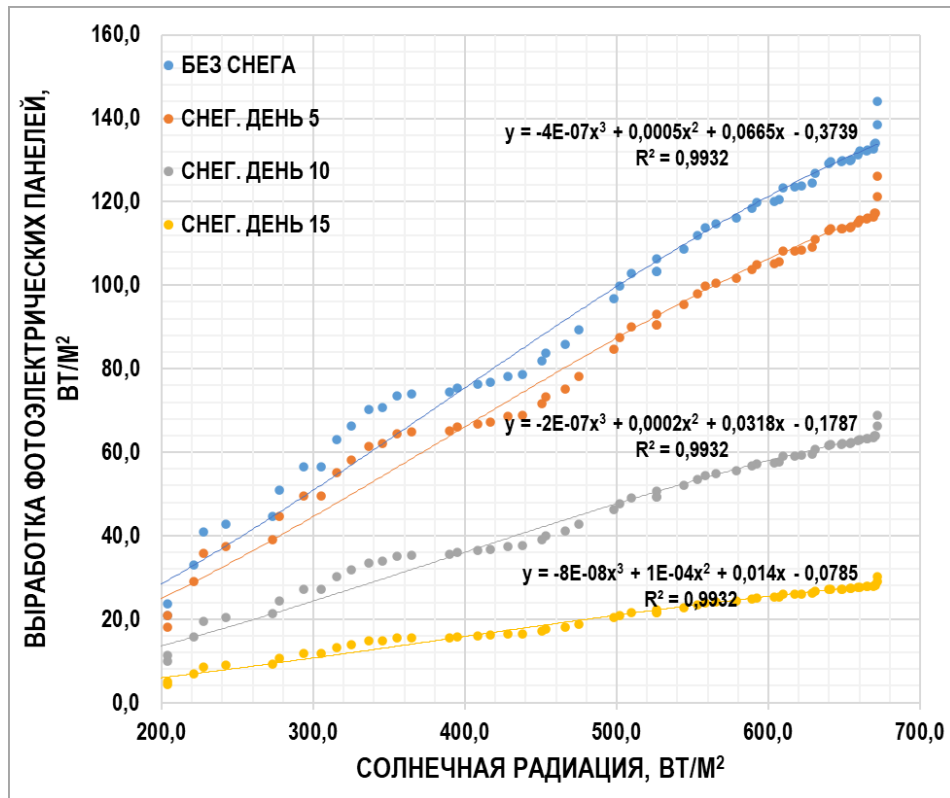


Рисунок 3.16 – Выработка электроэнергии от солнечной ЭС со снегом

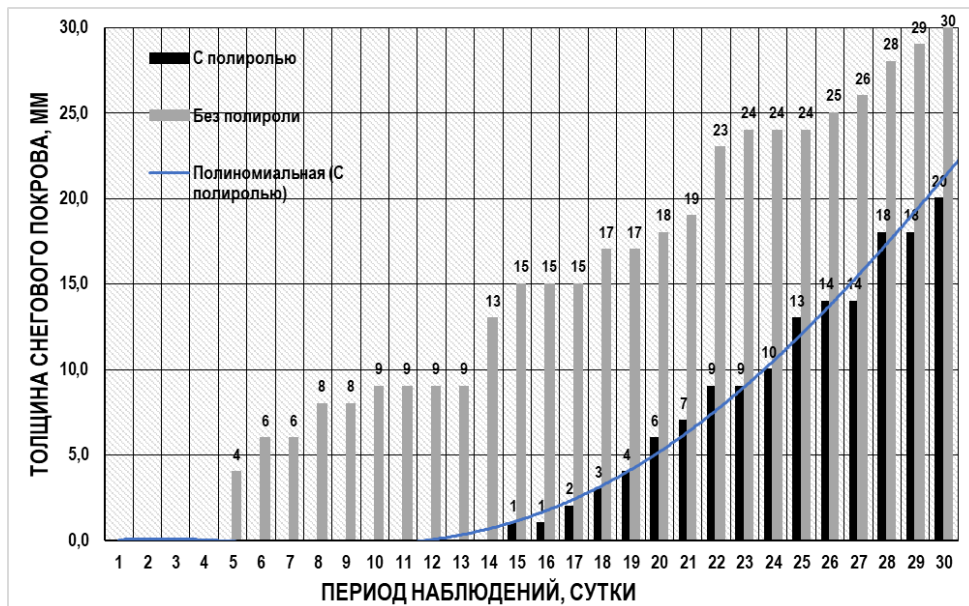


Рисунок 3.17 – Интенсивность образования снегового покрова на фотоэлектрических панелях

По причине увеличения толщины снегового покрова на поверхности ФЭП снижается выработка электроэнергии в виде полиномиальной зависимости. В случае образования снегового покрова на поверхности ФЭП толщиной от 4 мм генерирующая мощность установки уменьшается на 40...98%.

В таблицах 3.4, 3.5 представлены показатели снижения генерирующей мощности солнечной ЭС в зависимости от периода исследования [88, 93]. На рисунке 3.18 представлены графики среднестатистической выработки и ВАХ ФЭП в условиях негативного влияния поверхностного загрязнения (снегового покрова).

В рамках определения достоверности гипотезы снижения выработки солнечной ЭС по причине негативного влияния снегового покрова произведен расчет t -критерия Стьюдента.

Таблица 3.4 – Показатели снижения выработки солнечной электростанции при снеговом покрове [106, 201]

№	День наблюдения	Снижение генерирующей мощности ФЭП, %
1.	0	0,00 ± 2,86
2.	7	70,00 ± 2,86
3.	14	79,00 ± 2,86
4.	21	84,00 ± 2,86
5.	28	98,00 ± 2,86

Таблица 3.5 – Показатели снижения выработки солнечной электростанции при снеговом покрове [106, 201]

№	Наименование параметра	5-й день	10-й день	15-й день
1.	Снижение генерирующей мощности, %	12,4	52,2	79,0
2.	Общий недоотпуск электроэнергии, %	6,20	21,24	36,92

Период исследования аналогичной ФЭП с загрязненной и чистой поверхностью – 08:30...18:00 часов после полуночи в течение активной фазы светового дня (9,5 часов). Период шага исследования – около 12 минут. Количество шагов исследования определено по выражению (3.8):

$$N = \frac{T}{K} = \frac{570}{12} = 47,5 \approx 48, \quad (3.8)$$

где N – количество шагов исследования, ед.; T – общий период исследования, 9,5 часов × 60 мин = 570 мин; K – период шага исследования, 12 мин.

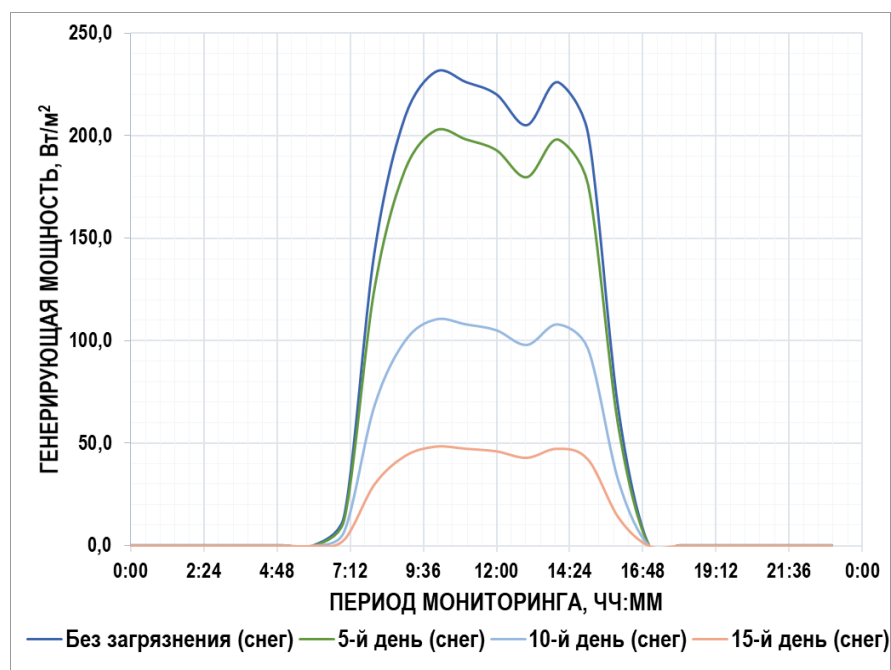


Рисунок 3.18 – Суточная выработка электроэнергии от солнечной электростанции при загрязнении снеговым покровом

Число степеней свободы определено по выражению (3.9):

$$\partial f = (N_1 + N_2) - j = (47 + 47) - 2 = 92, \quad (3.9)$$

где ∂f – число степеней свободы, ед.; N_1 – количество измерений в случае с чистой панелью (число выборки), 46 ед.; N_2 – количество измерений в случае с заснеженной панелью (число выборки), 46 ед.; j – количество видов выборки, 2 ед.

Расчет значения t -критерия Стьюдента производится по алгоритму (Рисунок 3.11). В таблице 3.6 и на рисунке 3.19 представлены результаты обработки данных. В Приложении В (Таблица В.2) указаны детали данных расчетов.

Таблица 3.6 – Результаты обработки экспериментальных данных

№	Наименование параметра	В.1	В.2
		$P_{\text{чист}}, \text{Вт/м}^2$	$P_{\text{загр.}}, \text{Вт/м}^2$
1.	Среднеарифметическое значение	44,47	5,78
2.	Медиана	43,18	5,61
3.	Среднее отклонение	-0,07	-0,08
4.	T -критерий Стьюдента ($T_{\text{кр}}$)	17,4	
Определение погрешности измерений			
5.	Средняя погрешность измерений, %	3,12	2,80
6.	Систематическая погрешность измерительных приборов, %	2,0	2,0
7.	Полная погрешность, %	3,71	2,02

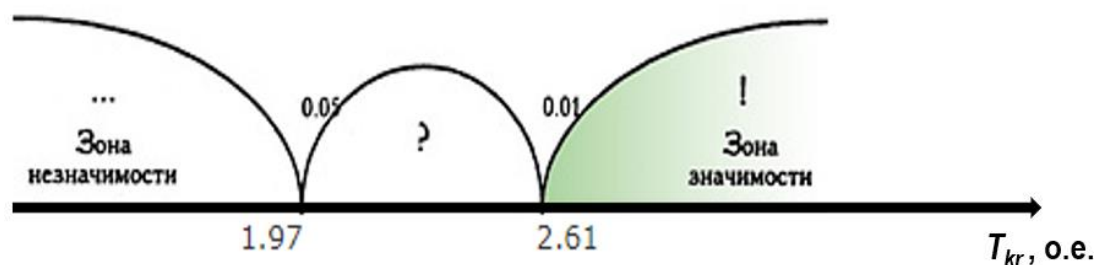


Рисунок 3.19 – Ось значимости гипотезы

T -критерий Стьюдента со значением 17,4 находится на промежутке уровня значимости $p \leq 0.01$ ($T_{кр} > 2,63$). Тем самым данный критерий находится в зоне значимости, объясняя достоверность гипотезы снижения выработки ФЭП вследствие влияния снегового покрова.

3.5 Исследование характера влияния подфакторов, снижающих интенсивность солнечного излучения, на функционирование солнечной электростанции

3.5.1 Исследование характера влияния задымления окружающей среды на функционирование солнечной электростанции

Представлены результаты натурных исследований по идентификации характера влияния задымления окружающей среды на выработку электроэнергии и режимов работы солнечной ЭС. Задымление окружающей среды является одной из причин снижения интенсивности солнечного излучения, которое проявляется вследствие возникновения сезонных лесных пожаров. Задымление негативно влияет на выработку электроэнергии и режимов работы солнечной ЭС. Данный подфактор имеет сезонный характер и проявляется в летний период.

В 2021 году площадь лесных пожаров в РС(Я) составила 8...9 млн. гектаров (в 2018 г. площадь пожаров составляла 0,26 млн. гектаров), что создает всевозможные условия для возникновения загрязнения окружающей среды. Основные причины лесных пожаров на территории РС(Я): сухие грозы (42%); человеческий фактор (41%); сельскохозяйственные палы (7,2%); др. На рисунке

3.20 представлены внешние виды Солнца при различных степенях задымленности окружающей среды.



Рисунок 3.20 – Внешние виды Солнца при степенях задымления:

а) малое; б) среднее; в) высокое

Исследование влияния задымления окружающей среды, вызванного сезонными лесными пожарами, на функционирование солнечной ЭС является необходимым для расчета параметров рабочих режимов и оценки энергетического потенциала. В соответствии с теорией планирования экспериментальных исследований определено необходимое количество опытов для установления характера влияния задымления окружающей среды на функционирование солнечной ЭС по выражению (3.10):

$$N = P^K = 2^2 = 4, \quad (3.10)$$

где N – количество опытов, ед.; P – число уровней каждого фактора, ед.; K – число факторов, ед. Число уровней каждого фактора – 2, число факторов – 2 (Рисунок 2.8).

Натурные исследования по идентификации характера влияния задымления окружающей среды на выработку электроэнергии и режимов работы солнечной ЭС выполнены в соответствии с алгоритмом, представленным на рисунке 3.21.

Исследование функционирования ФЭП проведено в течение летнего сезона с повторностью экспериментов до 4 ед. по размещению панелей в условиях сезонных лесных пожаров. На рисунках 3.22, 3.23 представлены среднестатистические графики выработки электроэнергии от солнечной ЭС, сформированные по выражению (3.11):

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathcal{E}_{\text{ясно}}^{\text{сутки}} = \int_0^{24} \mathcal{E}_{\text{ясно}}^{\text{ФЭП}}(t) dt \\ \mathcal{E}_{\text{дым}}^{\text{сутки}} = \int_0^{24} \mathcal{E}_{\text{дым}}^{\text{ФЭП}}(t) dt \\ \sum \mathcal{E}_{\text{ясно}} = \sum_{i=1}^{30} \mathcal{E}_{i.\text{ясно}}^{\text{сутки}} \\ \sum \mathcal{E}_{\text{дым}} = \sum_{i=1}^{30} \mathcal{E}_{i.\text{дым}}^{\text{сутки}} \\ \Delta_{\text{дым}}^{I,II,III} = \frac{\sum \mathcal{E}_{\text{дым}}}{\sum \mathcal{E}_{\text{ясно}}} \end{array} \right. , \quad (3.11)$$

где $\mathcal{E}_{\text{ясно}}^{\text{ФЭП}}$ – мгновенная мощность ФЭП при ясной погоде, Вт; $\mathcal{E}_{\text{ясно}}^{\text{сутки}}$ – среднесуточная выработка электроэнергии от ФЭП при ясной погоде, Вт·ч; $\mathcal{E}_{\text{дым}}^{\text{ФЭП}}$ – мгновенная мощность ФЭП при задымлении среды, Вт; $\mathcal{E}_{\text{дым}}^{\text{сутки}}$ – среднесуточная выработка электроэнергии от ФЭП при задымлении среды, Вт·ч; $\sum \mathcal{E}_{\text{ясно}}$ – среднемесячная выработка электроэнергии от ФЭП при ясной погоде, Вт·ч; $\sum \mathcal{E}_{\text{дым}}$ – среднемесячная выработка электроэнергии от ФЭП при задымлении среды, Вт·ч; $\Delta_{\text{дым}}^{I,II,III}$ – доля среднестатистического снижения выработки электроэнергии от ФЭП при задымлении среды (дополняющий коэффициент), о.е.; t – период исследования, ч.; i – порядковый номер суток мониторинга, сутки; I, II, III – степень задымления окружающей среды, от 1...3.

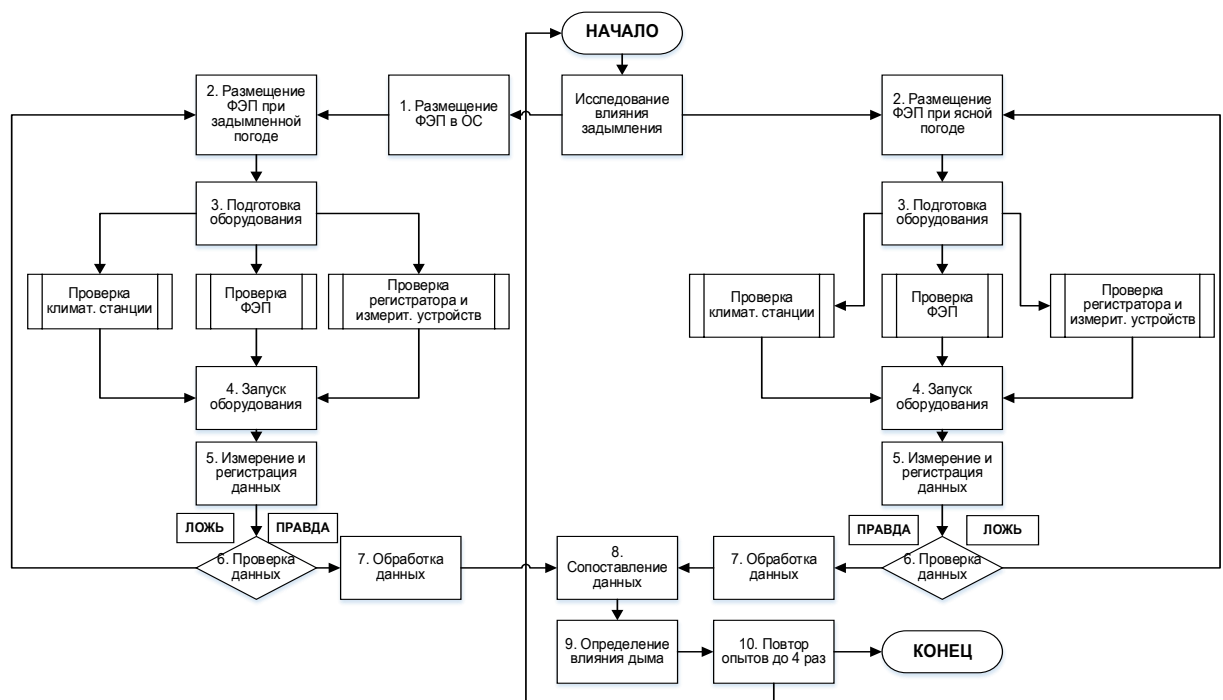


Рисунок 3.21 – Блок-схема алгоритма натуральных исследований

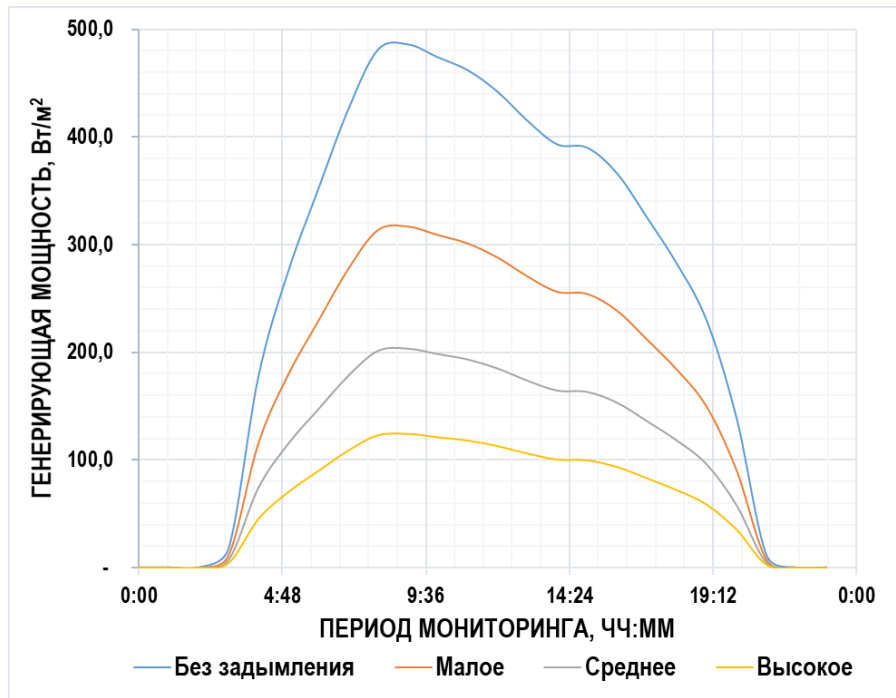


Рисунок 3.22 – Суточный график выработки электроэнергии от солнечной электростанции при задымлении окружающей среды

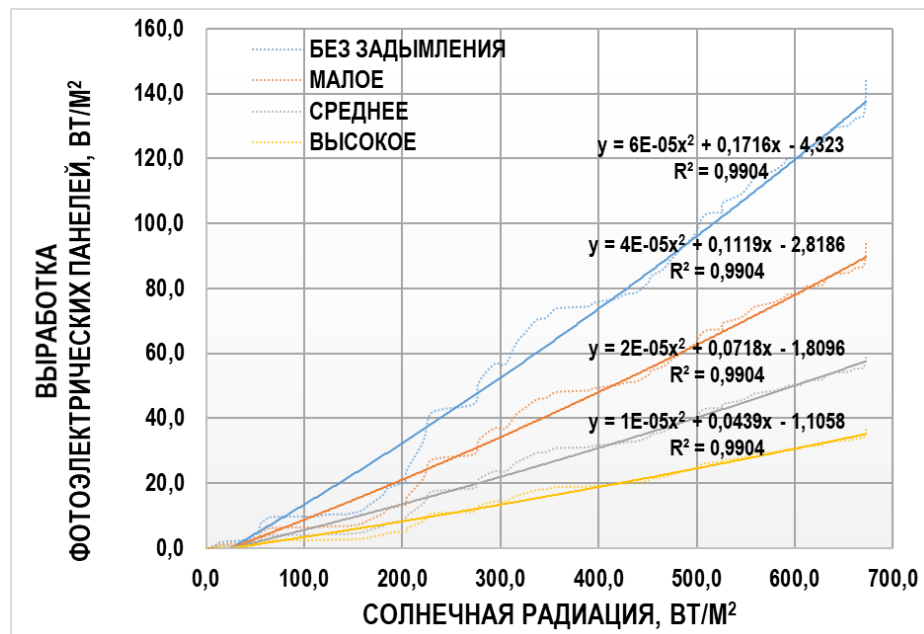


Рисунок 3.23 – Выработка электроэнергии от солнечной электростанции при задымлении окружающей среды

В таблице 3.7 представлены результаты анализа рабочих параметров солнечной ЭС в условиях задымления окружающей среды, вызванного сезонными лесными пожарами [15].

Таблица 3.7 – Показатели снижения выработки солнечной электростанции при сезонных лесных пожарах

№	Наименование параметра	Степень задымления окружающей среды		
		Малое	Среднее	Высокое
1.	Снижение генерирующей мощности, %	34,88	58,14	74,42
2.	Недоотпуск электроэнергии за 5 суток, %	17,44	29,07	37,21

В рамках определения достоверности гипотезы снижения выработки ФЭП вследствие влияния задымления окружающей среды выполнен расчет t -критерия Стьюдента. Период исследования ФЭП с очищенной поверхностью – 08:00...20:00 часов после полуночи в течение активной фазы светового дня (12 часов) в условиях чистой и задымленной окружающей среды. Период шага исследования – около 12 минут.

Количество шагов исследования определено по выражению (3.12):

$$N = \frac{T}{K} = \frac{720}{12} = 60, \quad (3.12)$$

где N – количество шагов исследования, ед.; T – общий период исследования, 12 часов = 720 мин; K – период шага исследования, 12 мин.

Число степеней свободы определено по выражению (3.13):

$$\partial f = (N_1 + N_2) - j = (60 + 60) - 2 = 118, \quad (3.13)$$

где ∂f – число степеней свободы, ед.; N_1 – количество измерений в условиях чистой погоды (число выборки), 60 ед.; N_2 – количество измерений в условиях задымления окружающей среды (число выборки), 60 ед.; j – количество видов выборки, 2 ед.

Расчет значения t -критерия Стьюдента производится по алгоритму (Рисунок 3.11). В таблице 3.8 и на рисунке 3.24 представлены результаты обработки данных. В Приложении В (Таблица В.3) указаны детали данных расчетов.

Таблица 3.8 – Результаты обработки экспериментальных данных

№	Наименование параметра	В.1	В.2
		$P_{\text{чист}}, \text{Вт/м}^2$	$P_{\text{загр.}}, \text{Вт/м}^2$
1.	Среднеарифметическое значение	11,73	48,08
2.	Медиана	11,09	53,37

№	Наименование параметра	В.1 Р _{чист} , Вт/м ²	В.2 Р _{загр} , Вт/м ²
3.	Среднее отклонение	0,085	0,22
4.	T–критерий Стьюдента	10,0	
Определение погрешности измерений			
5.	Средняя погрешность измерений, %	1,09	3,42
6.	Систематическая погрешность измерительных приборов, %	2,0	2,0
7.	Полная погрешность, %	2,28	3,96

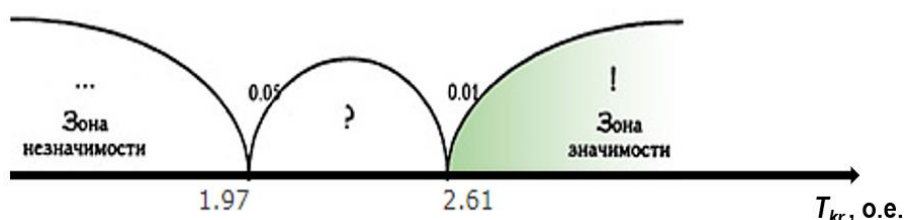


Рисунок 3.24 – Ось значимости гипотезы

T–критерий Стьюдента со значением 10,0 находится на промежутке уровня значимости $p \geq 0.01$ ($T_{кр} > 2,61$). Тем самым данный критерий находится в зоне значимости, объясняя достоверность гипотезы снижения выработки ФЭП вследствие влияния задымления окружающей среды, вызванного лесными пожарами.

3.5.2 Исследование характера влияния облачности на функционирование солнечной электростанции

Представлены результаты натурных исследований по идентификации характера влияния облачности на выработку электроэнергии и режимов работы солнечной ЭС. Облачность является ключевой причиной снижения активности солнечного излучения, падающего на горизонтальную поверхность Земли, и негативно влияет на выработку электроэнергии и режим работы солнечной ЭС. При краткосрочном прогнозировании (сутки) влияние данного подфактора на выработку электроэнергии и режимов работы солнечной ЭС имеет переменный характер, при среднесрочном прогнозировании (неделя, месяц, год) – постоянный. На рисунке 3.25 внешние изображения видов облачности.

Исследование функционирования солнечной ЭС проведено в течение весенне-осеннего периода при различных видах облачности. В рамках определения конкретного вида облачности произведены замеры освещенности окружающей среды у поверхности ФЭП, в таблице 3.9 представлены результаты в сравнении с реально существующими показателями освещенности при пасмурной погоде [90].

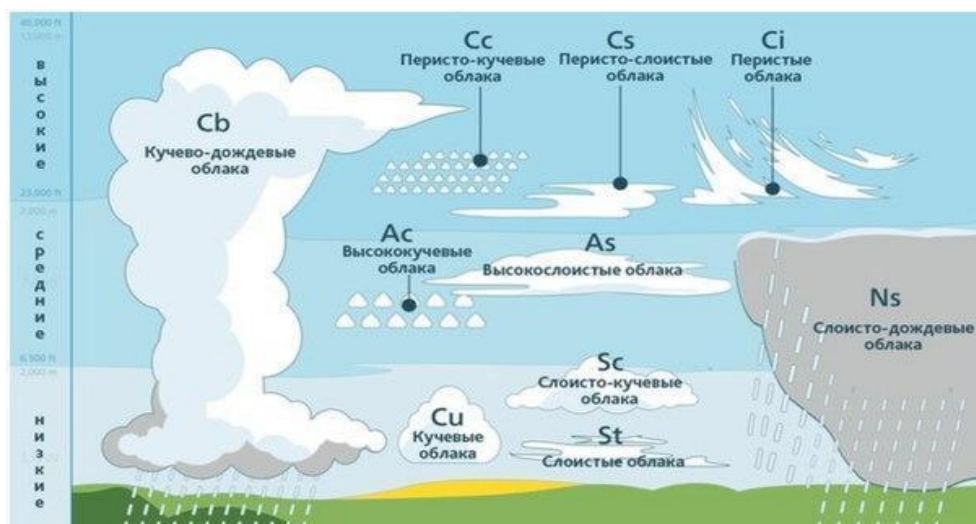


Рисунок 3.25 – Внешние изображения видов облачности

Среднее отклонение результатов замеров освещенности в сравнении с показателями освещенности, указанными в источнике [109] при различных видах облачности, составило 7,95%, что объяснено значительной сложностью визуального определения вида облачности или ее граничных состояний.

Таблица 3.9 – Результаты замеров освещенности окружающей среды у поверхности фотоэлектрической панели [90]

№	Вид облачности	Краткое обозначение	Средняя освещенность, лк [19]	Средняя освещенность замеров, лк	Разница, %
1	Перистые облака	Ci	33000	36200	8,8
2	Перисто-кучевые облака	Cc	30400	33138	9,0
3	Перисто-слоистые облака	Cs	29800	32377	8,6
4	Высококучевые облака	Ac	26600	29220	9,8
5	Высокослоистые облака	As	22400	20401	9,7
6	Слоисто-кучевые	Sc	18200	19396	6,5
7	Слоистые облака	St	17800	18864	5,9
8	Слоисто-дождевые облака	Ns, Frnb	11100	10105	9,8
9	Кучевые облака	Cu	9500	9736	2,4
10	Кучево-дождевые облака	Cb	2800	3054	9,0
Среднее отклонение, %:					7,95

Известно, что выработка электроэнергии от ФЭП зависит от температуры ее поверхности, солнечной радиации на поверхности ФЭП и ее поверхностного загрязнения. В связи с этим исследование влияния различных видов облачности на функционирование солнечной ЭС является необходимым для расчета параметров рабочих режимов в течение всего периода эксплуатации и оценке энергетического потенциала. Натурные исследования по определению характера влияния облачности на выработку электроэнергии от солнечной ЭС проведены в соответствии с алгоритмом (Рисунок 3.26).

В соответствии с теорией планирования экспериментальных исследований определено необходимое количество опытов для определения характера влияния задымления окружающей среды на функционирование ФЭП в соответствии с выражением (3.14):

$$N = P^K = 2^2 = 4, \quad (3.14)$$

где N – количество опытов, ед.; P – число уровней каждого фактора, ед.; K – число факторов, ед. Число уровней каждого фактора – 2, число факторов – 2 (Рисунок 2.8).

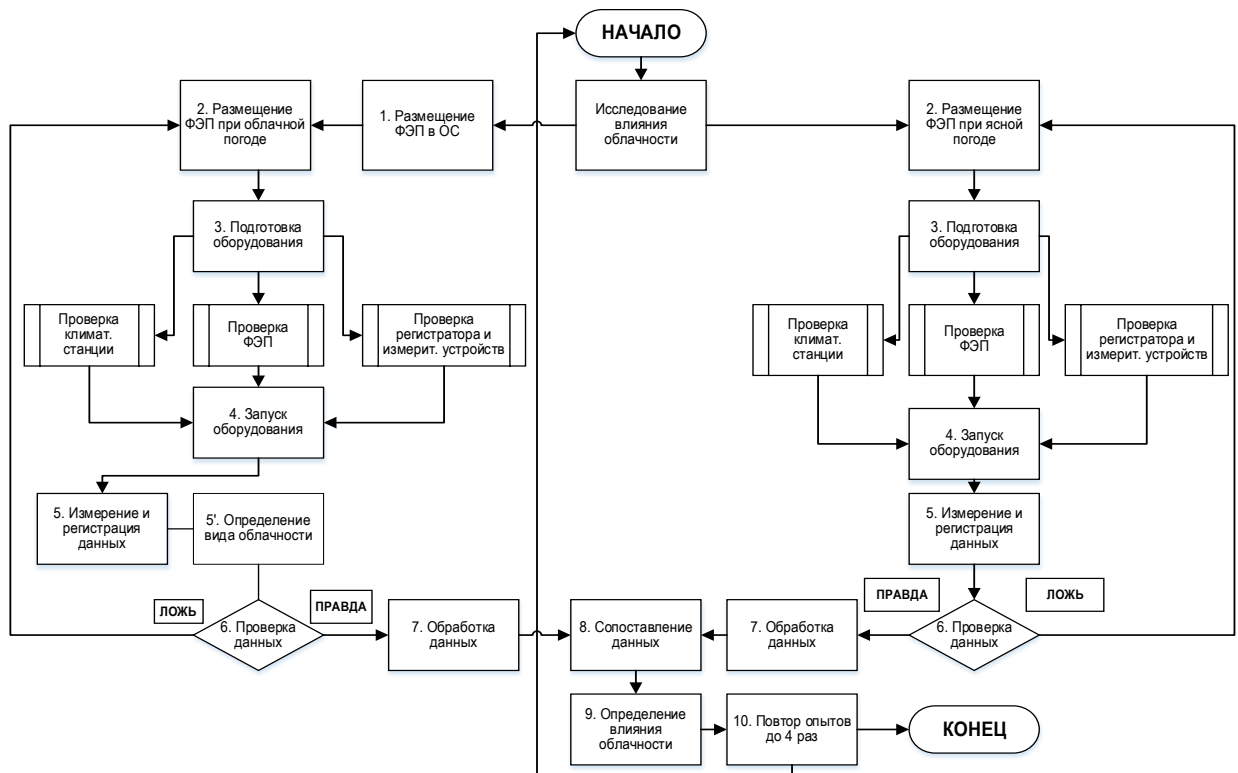


Рисунок 3.26 – Алгоритм выполнения натуральных исследований

Исследование функционирования солнечной ЭС проведено в течение весенне-осеннего периода с повторностью экспериментов до 4 ед. по размещению ФЭП в условиях окружающей среды в течение 180 суток. На рисунках 3.27, 3.28 представлены среднестатистические графики мониторинга выработки электроэнергии от солнечной ЭС при различных видах облачности в течение периода исследования по выражению (3.15):

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathcal{E}_{\text{ясно}}^{\text{сутки}} = \int_0^{24} \mathcal{E}_{\text{ясно}}^{\text{ФЭП}}(t) dt \\ \mathcal{E}_{\text{облачно}}^{\text{сутки}} = \int_0^{24} \mathcal{E}_{\text{облачно}}^{\text{ФЭП}}(t) dt \\ \sum \mathcal{E}_{\text{ясно}} = \sum_{i=1}^{180} \mathcal{E}_{i.\text{ясно}}^{\text{сутки}} \\ \sum \mathcal{E}_{\text{облачно}} = \sum_{i=1}^{180} \mathcal{E}_{i.\text{облачно}}^{\text{сутки}} \\ \Delta_{\text{облачно}}^{I,II,III} = \frac{\sum \mathcal{E}_{\text{облачно}}}{\sum \mathcal{E}_{\text{ясно}}} \end{array} \right. , \quad (3.15)$$

где $\mathcal{E}_{\text{ясно}}^{\text{ФЭП}}$ – мгновенная мощность ФЭП при ясной погоде, Вт; $\mathcal{E}_{\text{ясно}}^{\text{сутки}}$ – среднесуточная выработка электроэнергии от ФЭП при ясной погоде, Вт·ч; $\mathcal{E}_{\text{облачно}}^{\text{ФЭП}}$ – мгновенная мощность ФЭП при облачной погоде, Вт; $\mathcal{E}_{\text{облачно}}^{\text{сутки}}$ – среднесуточная выработка электроэнергии от ФЭП при облачной погоде, Вт·ч; $\sum \mathcal{E}_{\text{ясно}}$ – среднемесячная выработка электроэнергии от ФЭП при ясной погоде, Вт·ч; $\sum \mathcal{E}_{\text{облачно}}$ – среднемесячная выработка электроэнергии от ФЭП при облачной погоде, Вт·ч; $\Delta_{\text{облачно}}^{I,II,III}$ – доля среднестатистического снижения выработки электроэнергии от ФЭП при облачной погоде (дополняющий коэффициент), о.е.; t – период исследования, ч.; i – порядковый номер суток мониторинга, сутки; $I...X$ – вид облачности, ≤ 10 видов.

В таблице 3.10 представлены результаты анализа выработки электроэнергии от солнечной ЭС в условиях различных видов облачности [90].

Таблица 3.10 – Параметры солнечной электростанции в условиях облачности

№	Вид облачности	Снижение генерирующей мощности ФЭП, %	Недоотпуск электроэнергии за 5 суток, %
1.	Ci	8,03	4,01
2.	Cc	25,60	12,80
3.	Cs	26,57	13,28
4.	Ac	49,60	24,80
5.	As	51,00	25,50
6.	Sc	53,64	26,82
7.	St	76,83	38,41
8.	Ns, Frnb	85,13	42,56
9.	Cu	87,13	43,56
10.	Cb	95,18	47,59

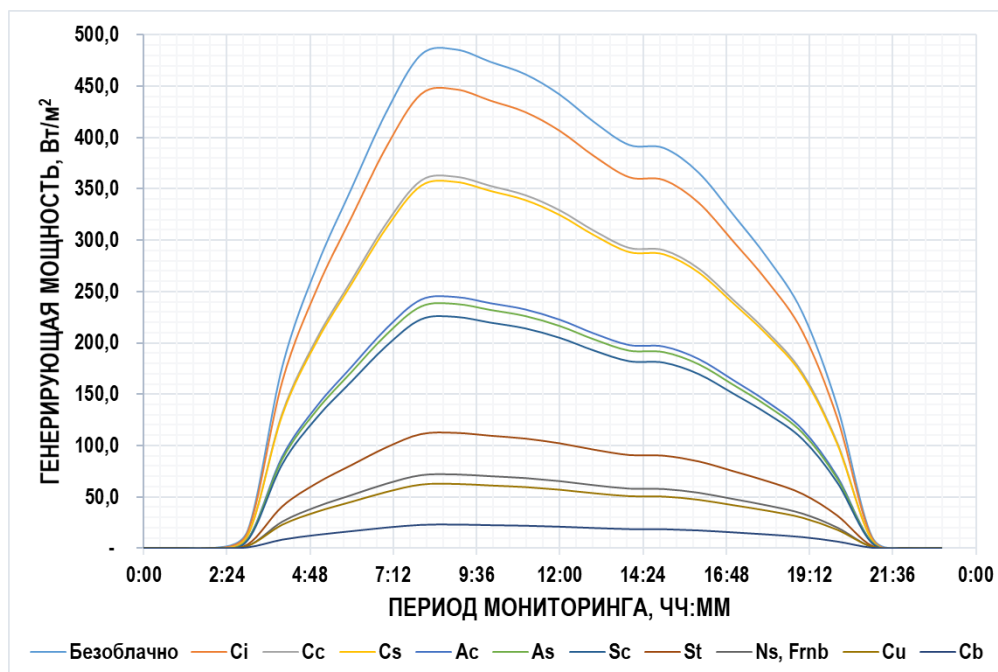


Рисунок 3.27 – Суточный график выработки электроэнергии от солнечной электростанции при различных видах облачности

В рамках определения достоверности гипотезы снижения выработки ФЭП вследствие влияния различных видов облачности выполнен расчет t -критерия Стьюдента. Период исследования работ с ФЭП – 08:00...21:00 часов после полуночи в течение активной фазы светового дня (13 часов) в условиях облачной погоды. Период шага исследования – около 12 минут. В рамках определения достоверности гипотезы снижения выработки ФЭП вследствие влияния различных видов облачности выполнен расчет t -критерия Стьюдента. Период исследования работ с ФЭП – 08:00...21:00 часов после полуночи в течение активной фазы

светового дня (13 часов) в условиях облачной погоды. Период шага исследования – около 12 минут.

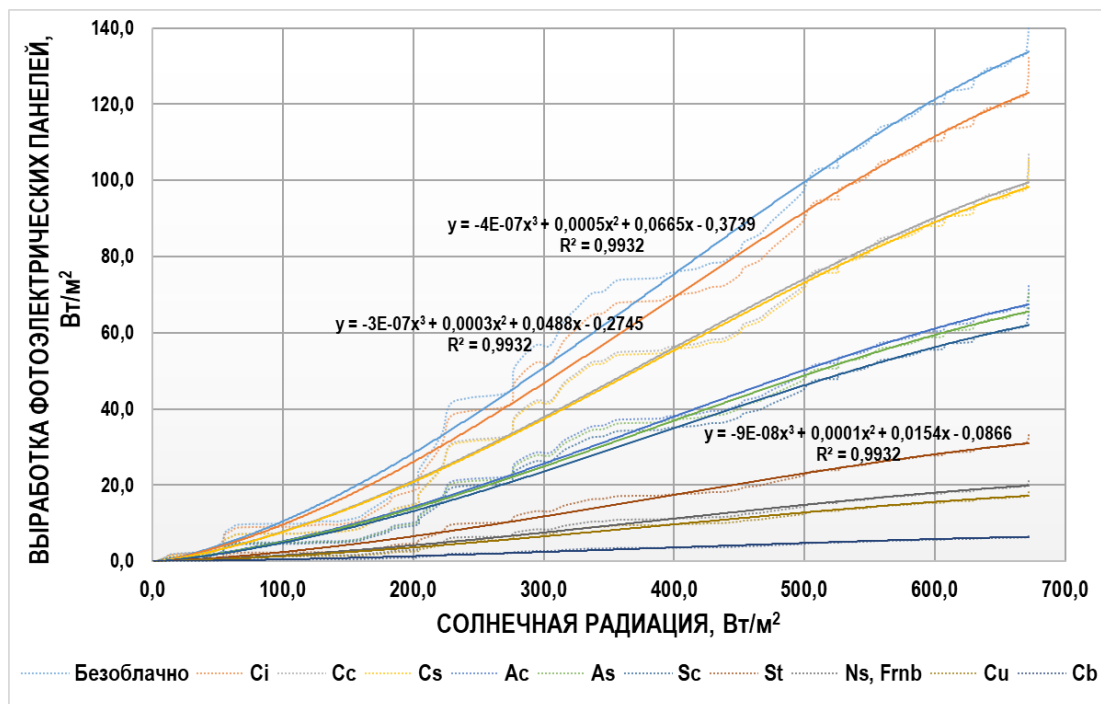


Рисунок 3.28 – Выработка электроэнергии от солнечной электростанции при различных видах облачности

Количество шагов исследования определено по выражению (3.16):

$$N = \frac{T}{K} = \frac{780}{12} = 65, \quad (3.16)$$

где N – количество шагов исследования, ед.; T – общий период исследования, 13 часов = 780 мин; K – период шага исследования, 12 мин.

Число степеней свободы определено по выражению (3.17):

$$\partial f = (N_1 + N_2) - j = (65 + 65) - 2 = 128, \quad (3.17)$$

где ∂f – число степеней свободы, ед.; N_1 – количество измерений в условиях чистой погоды (число выборки), 65 ед.; N_2 – количество измерений в условиях облачной погоды (число выборки), 65 ед.; j – количество видов выборки, 2 ед.

Расчет значения t -критерия Стьюдента производится по алгоритму (Рисунок 3.11). В таблице 3.11 на рисунке 3.29 представлены результаты обработки данных, а в Приложении В (Таблица В.4) указаны детали данных расчетов.

Таблица 3.11 – Результаты обработки экспериментальных данных

№	Наименование параметра	В.1 Р _{чист} , Вт/м ²	В.2 Р _{загр.} , Вт/м ²
1.	Среднеарифметическое значение	41,078	2,153
2.	Медиана	45,932	2,407
3.	Среднее отклонение	25,88	1,35
4.	Т–критерий Стьюдента	12,1	
Определение погрешности измерений			
5.	Средняя погрешность измерений, %	3,2	0,2
6.	Систематическая погрешность измерительных приборов, %	2,0	2,0
7.	Полная погрешность, %	3,76	2,01

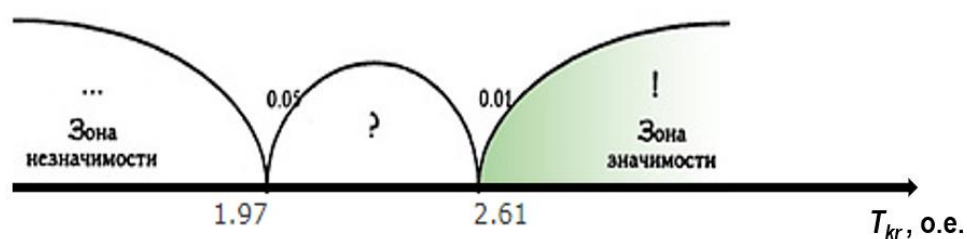


Рисунок 3.29 – Ось значимости гипотезы

Т–критерий Стьюдента со значением 12,1 находится на промежутке уровня значимости $p \geq 0.01$ ($T_{kr} > 2,61$). Тем самым данный критерий находится в зоне значимости, объясняя достоверность гипотезы снижения выработки ФЭП вследствие влияния различных видов облачности.

3.6 Исследование характера влияния температуры окружающей среды на функционирование солнечной электростанции

Представлены результаты натурных исследований по идентификации характера влияния температуры окружающей среды на выработку электроэнергии и режимов работы солнечной ЭС. Данный подфактор значительно влияет на вольтамперные характеристики, выработку и производительность солнечной ЭС. ФЭП являются полупроводниковой установкой, где в диапазоне отрицательных температур выработка увеличивается, а при высоких положительных температурах уменьшается в условиях идентичной освещенности. Посредством проведения натурных исследований определены показатели изменения электроэнергетических

параметров функционирования ФЭП с применением герметизированной климатической камеры, стационарного источника света, перечня измерительных и регистрирующих устройств и др. На рисунке 3.30 представлен ход проведения натуральных исследований.



Рисунок 3.30 – Натурные исследования внутри климатической камеры

Исследование функционирования солнечной ЭС проведено в течение одного месяца в условиях диапазона температуры окружающей среды от -60 до $+60$ °С при постоянной освещенности от стационарного источника света без изменения относительной влажности окружающей среды.

По теории планирования экспериментальных исследований определено необходимое количество опытов для выявления характера влияния температуры окружающей среды на функционирование солнечной ЭС по выражению (3.18):

$$N = P^K = 2^3 = 8, \quad (3.18)$$

где N – количество опытов, ед.; P – число уровней каждого фактора, ед.; K – число факторов, ед. Число уровней каждого фактора – 2, число факторов – 3 (Рисунок 2.8).

Натурные исследования по определению характера влияния температуры окружающей среды на выработку электроэнергии и режимов работы солнечной ЭС проведены в соответствии с алгоритмом (Рисунок 3.31).

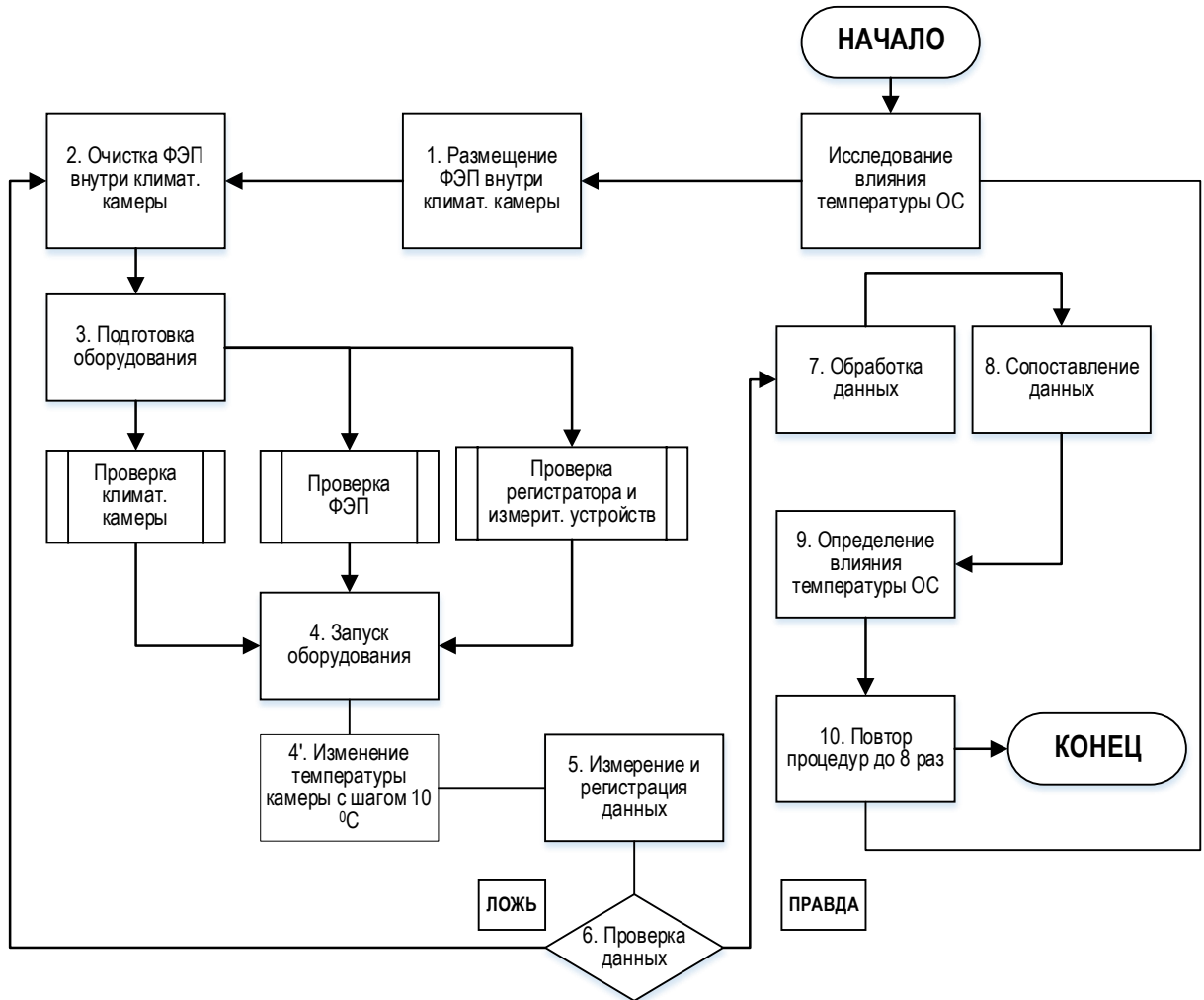


Рисунок 3.31 – Алгоритм выполнения натуральных исследований

На рисунках 3.32, 3.33 представлены электроэнергетические характеристики функционирования солнечной ЭС в течение периода исследования по выражению (3.19):

$$\left\{ \begin{array}{l} \mathcal{E}_{исх} = \int_0^1 \mathcal{E}_{T=0^{\circ}C}^{\PhiЭП}(t) dt \\ \mathcal{E}_{темн}^{T=-60...+40^{\circ}C} = \int_0^1 \mathcal{E}_{T=-60...+40^{\circ}C}^{\PhiЭП}(t) dt \\ \Delta_{темн}^{T=-60...+40^{\circ}C} = \frac{\mathcal{E}_{темн}^{T=-60...+40^{\circ}C}}{\mathcal{E}_{исх}} \end{array} \right. \quad (3.19)$$

где $\mathcal{E}_{T=0^{\circ}C}^{\PhiЭП}$ – мгновенная мощность ФЭП при исходной температуре ($0^{\circ}C$), Вт/м²;

$\mathcal{E}_{исх}$ – среднечасовая выработка электроэнергии от ФЭП при исходной температуре,

Вт·ч/м²; $\mathcal{E}_{T=-60...+40^{\circ}C}^{\PhiЭП}$ – мгновенная мощность ФЭП при различных диапазонах

температуры ($-60\dots+40$ °C), Вт/м²; $\mathcal{E}_{T=-60\dots+40}^{temp}$ – среднечасовая выработка электроэнергии от ФЭП при различных диапазонах температуры, Вт·ч/м²; $\Delta_{temp}^{T=-60\dots+40}$ °C – доля среднестатистического снижения выработки электроэнергии от ФЭП при определенной температуре (дополняющий коэффициент), о.е.; t – период исследования, ч.

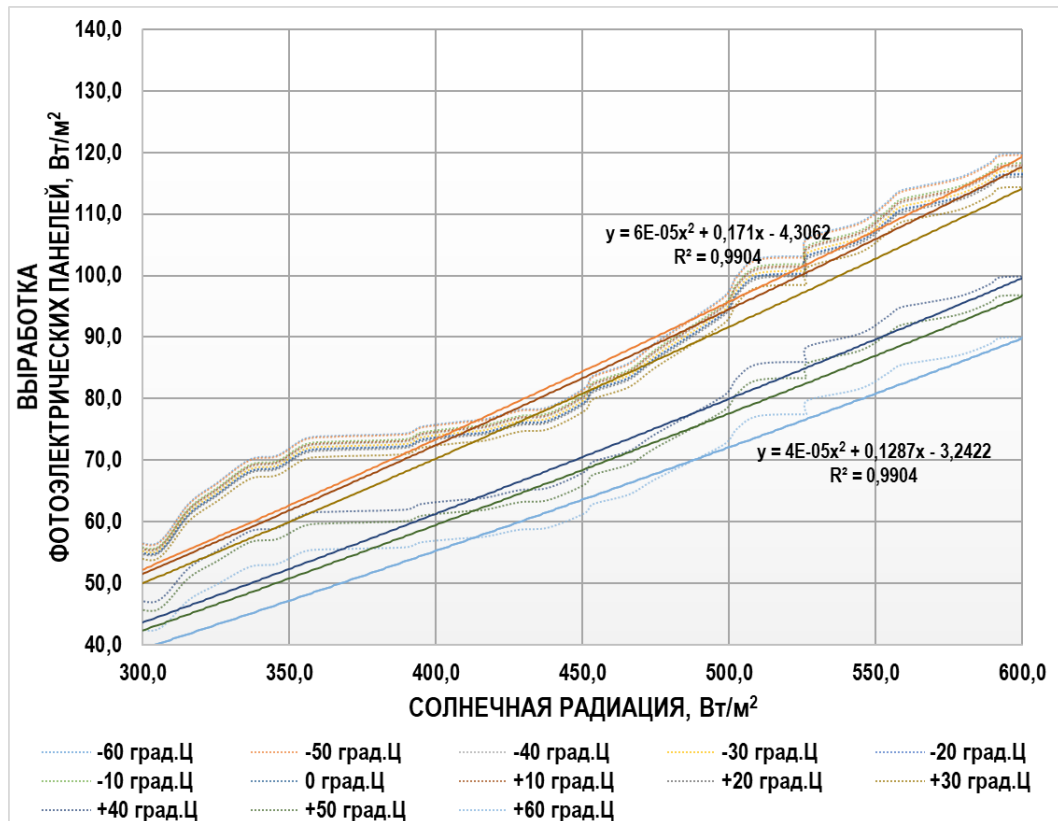


Рисунок 3.32 – Суточный график выработки электроэнергии от солнечной электростанции при различных температурах окружающей среды

Среднестатистическая интерполяция фактических и расчетных данных генерирующей мощности на всем температурном промежутке составляет 1,27%. В условиях отрицательных температур ФЭП показывает более эффективную выработку, где генерирующая мощность при минимальной (-60 °C) температуре увеличивается на 1,46% и при максимальной ($+60$ °C) температуре уменьшается на 17,8% относительно исходной расчетной температуры (-12 °C). В таблице 3.12 представлены результаты анализа выработки электроэнергии от солнечной ЭС в условиях различных температур окружающей среды [93].

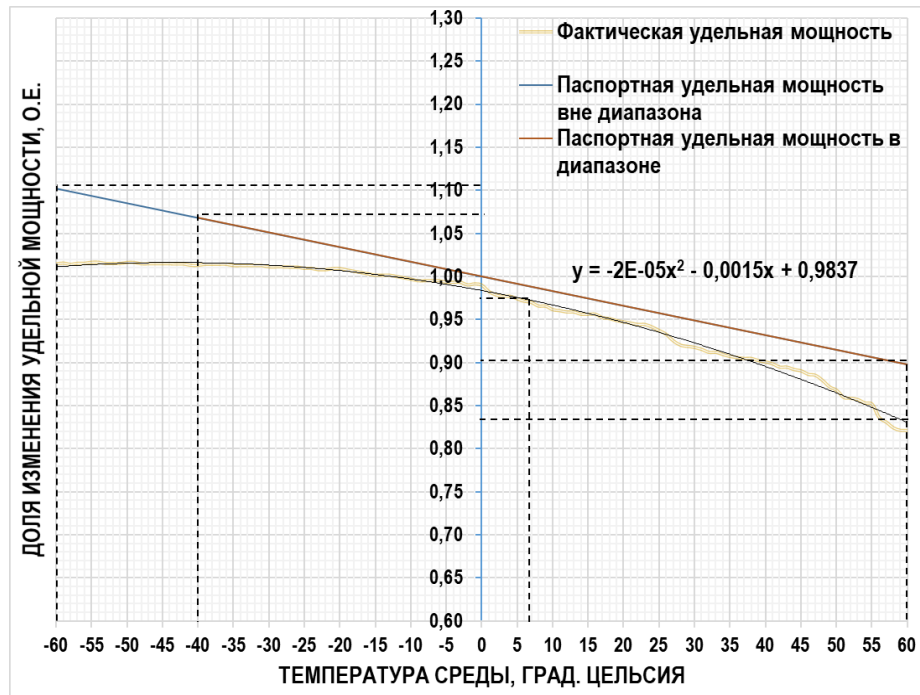


Рисунок 3.33 – Выработка электроэнергии от солнечной электростанции при различных температурах окружающей среды

В рамках определения достоверности гипотезы снижения выработки ФЭП вследствие влияния температуры окружающей среды выполнен расчет t -критерия Стьюдента. Период исследования работ с ФЭП с очищенной поверхностью составит 14,4 часов в условиях изменения температуры окружающей среды внутри климатической камеры. Период шага исследования – около 12 минут. Количество шагов исследования определено по выражению (3.20):

$$N = \frac{T}{K} = \frac{864}{12} = 72, \quad (3.20)$$

где N – количество шагов исследования, ед.; T – общий период исследования, 14,4 часов = 864 мин; K – период шага исследования, 12 мин.

Таблица 3.12 – Параметры солнечной электростанции при различных температурах окружающей среды

Температура окр. среды, °С	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	+10	+20	+30	+40
Снижение генерирующей мощности, %	0,16	0,39	1,91	2,46	2,84	1,41	2,96	1,69	3,28	4,64	16,8
Общий недоотпуск электроэнергии, %	0,08	0,19	0,95	1,23	1,42	0,70	1,48	0,84	1,64	2,32	8,4

Число степеней свободы определено по выражению (3.21):

$$\partial f = (N_1 + N_2) - j = (72 + 72) - 2 = 142, \quad (3.21)$$

где ∂f – число степеней свободы, ед.; N_1 – количество измерений в условиях минимальной температуры (число выборки), 72 ед.; N_2 – количество измерений в условиях максимальной температуры (число выборки), 72 ед.; j – количество видов выборки, 2 ед.

Расчет значения t -критерия Стьюдента производится по алгоритму (Рисунок 3.11). В таблице 3.13 и на рисунке 3.34 представлены результаты обработки данных, а в Приложении В (Таблица В.5) указаны детали данных расчетов.

Таблица 3.13 – Результаты обработки экспериментальных данных

№	Наименование параметра	В.1 Р _{чист} , Вт/м ²	В.2 Р _{загр.} , Вт/м ²
1.	Среднеарифметическое значение	40,59	33,30
2.	Медиана	44,65	36,62
3.	Среднее отклонение	29,64	24,31
4.	T-критерий Стьюдента	12,2	
Определение погрешности измерений			
5.	Средняя погрешность измерений, %	3,46	2,84
6.	Систематическая погрешность измерительных приборов, %	2,0	2,0
7.	Полная погрешность, %	4,00	3,47

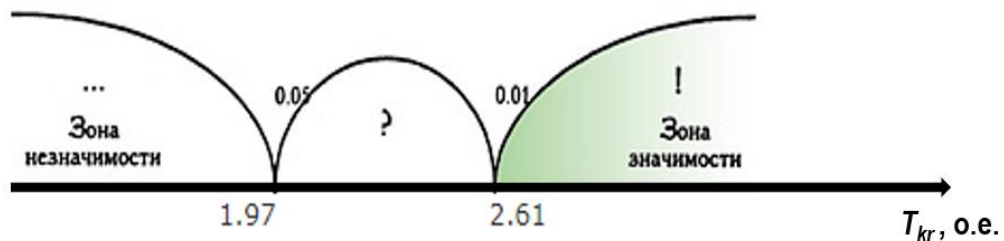


Рисунок 3.34 – Ось значимости гипотезы

T -критерий Стьюдента со значением 12,2 находится на промежутке уровня значимости $p \geq 0.01$ ($T_{кр} > 2,61$). Тем самым данный критерий находится в зоне значимости, объясняя достоверность гипотезы изменения выработки ФЭП вследствие влияния температуры окружающей среды.

3.7 Исследование комплексного влияния внешних факторов на функционирование солнечной электростанции

В результате выполнения натуральных исследований (§3.4–3.6) определены характер и показатели влияния ключевых внешних факторов на функционирование солнечной ЭС. Известно, что в зависимости от сезона эксплуатации перечень внешних факторов, влияющих на работу солнечной ЭС, постоянно меняется. Исследование комплексного влияния нескольких внешних факторов имеет высокую практическую значимость.

Идентификация комплексного влияния внешних факторов Севера, не зависящих друг от друга, на выработку электроэнергии от солнечной ЭС выполнена по выражению (3.22):

$$P(A + B) = P(A) + P(B) - P(A \times B), \quad (3.22)$$

где $P(A)$ – показатель влияния внешнего фактора – 1, о.е.; $P(B)$ – показатель влияния внешнего фактора – 2, о.е.

Подразумевается идентификация комплексного влияния не более двух внешних факторов, так как вычисление влияния трех и более факторов имеет высокую сложность. В таблице 3.14 представлены результаты вычислений комплексного влияния не более двух внешних факторов на функционирование солнечной ЭС.

Таблица 3.14 – Показатели комплексного влияния факторов

Уровень I	Наименование факторов	Поверх. загрязнение		Снижение интенсивности солнечного излучения		Поверх. температура ФЭП	
		Пыль	Снег	Облако	Лесной пожар		
Наименование факторов	Уровень II	Уменьшение генерирующей мощности, %					Тос
Поверх. загрязнение		Пыль	Зима	–	–	–	
	Весна		44	83	72	–	45
	Лето		44	–	72	75	53
	Снег	Зима	–	70	75	–	70
		Весна	83	70	85	–	71

Уровень I	Наименование факторов		Поверх. загрязнение		Снижение интенсивности солнечного излучения		Поверх. температура ФЭП
			Пыль	Снег	Облако	Лесной пожар	
Наименование факторов	Уровень II		Уменьшение генерирующей мощности, %				
Поверх. загрязнение	Снег	Лето	–	–	–	–	–
Снижение солнечного излучения	Облако	Зима	–	75	17	–	18
		Весна	72	85	51	–	52
		Лето	72	–	51	78	59
	Лесной пожар	Зима	–	–	–	–	–
		Весна	–	–	–	–	–
		Лето	75	–	78	56	63
Поверх. температура ФЭП	Тос	Зима	–	70	18	–	1,9
		Весна	45	71	52	–	2,9
		Лето	53	–	59	63	16

В связи с этим получены показатели негативного влияния 1 и/или 2-х факторов в одновременном порядке на функционирование солнечной ЭС.

3.8 Математическая модель функционирования солнечной электростанции, учитывающая внешние факторы

Представлены циклы работы разработанной математической модели функционирования солнечной ЭС с приведением блок–схемы алгоритма (Рисунок 3.36) и этапов моделирования (Рисунок 3.35). Данная модель разработана на базе лицензированной программы MS Office Excel. В модели применены ранее идентифицированный перечень электроэнергетических и технико-экономических закономерностей в соответствии с выражениями (2.66) – (2.77) из Главы 2, а также показатели и характер влияния внешних факторов, определенные в §3.4–3.7 из Главы 3.

Подавляющий перечень климатических особенностей Севера обосновывается наличием резко-континентального климата, имеющего свою специфику и особенности (полярные дни и ночи, резкое увеличение или уменьшение температуры окружающей среды, неравномерное распределение

осадков и др.). Практически весь перечень климатических особенностей имеет значительную зависимость от периода (сезона) эксплуатации солнечной ЭС. При учете вышеуказанных факторов получаем обновленную закономерность расчета фактической выработки электроэнергии от солнечной ЭС по выражению (3.23):

$$P_{СЭСфакт}(T_{свет}, t, \varphi, V) = P_{СП} - \Delta P_{пыль} - \Delta P_{снег} - \Delta P_{СП}(t, \varphi, C) - \Delta P_{СП}(\varphi, \%) + \Delta P_{обл} - \Delta P_{дым}, \quad (3.23)$$

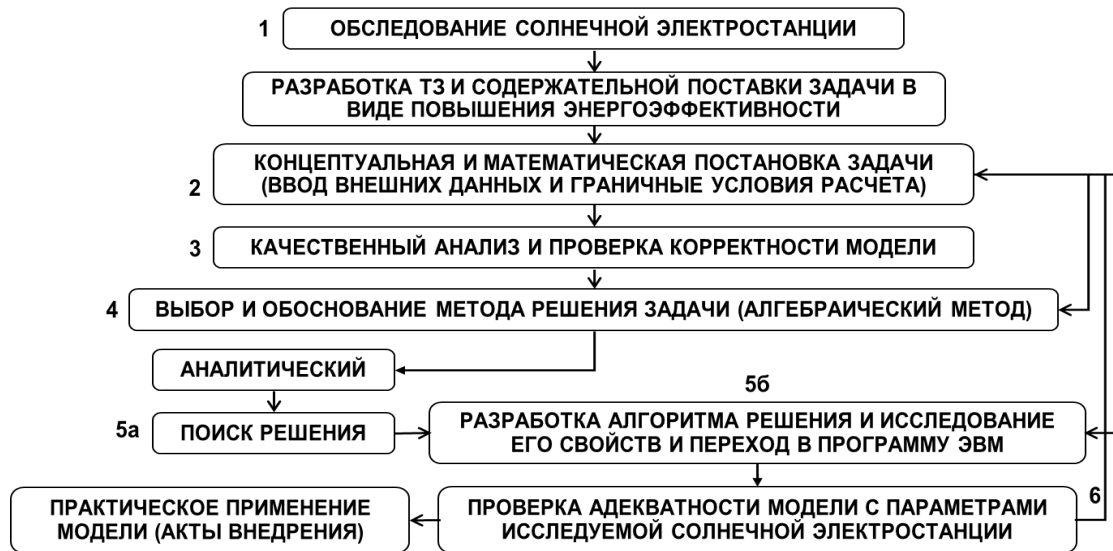


Рисунок 3.35 – Этапы процесса моделирования солнечной электростанции

Введены дополняющие коэффициенты для обновления существующей методики расчета годовой выработки электроэнергии от солнечной ЭС. Сущность данного обновления заключается в учете внешних факторов (облачность, пыль, снег, лесные пожары). В связи с этим по выражению (3.24) производится расчет годовой выработки, учитывающий внешние факторы:

$$\mathcal{E}_{ФЭП.факт}^{год} = \begin{cases} \mathcal{E}_{ФЭП.факт}^{год} = \mathcal{E}_{ФЭП}^{год} - \sum \Delta \mathcal{E}_{потери}^{год} \\ \mathcal{E}_{ФЭП}^{год} = \sum_{i=1}^{12} \mathcal{E}_{ФЭП}(\eta_{ФЭП}, E_{инс}, P_{инс}, P_{ФЭП}, K_{КИ}), \\ \Delta \mathcal{E}_{потери}^{год} = \Delta \mathcal{E}_{дым}^{год} + \Delta \mathcal{E}_{пыль}^{год} + \Delta \mathcal{E}_{снег}^{год} \end{cases}, \quad (3.24)$$

где $\mathcal{E}_{ФЭП.факт}^{год}$ – фактическая годовая выработка солнечной ЭС, кВт·ч; $\mathcal{E}_{ФЭП}^{год}$ – годовая выработка солнечной ЭС без учета влияния внешних факторов, кВт·ч; $\sum \Delta \mathcal{E}_{потери}^{год}$ – суммарные годовые потери выработки солнечной ЭС от внешних факторов, кВт·ч;

$\Delta \mathcal{E}_{\text{дым}}^{\text{год}}$ – годовые потери выработки солнечной ЭС от лесных пожаров, кВт·ч; $\Delta \mathcal{E}_{\text{пыль}}^{\text{год}}$ – годовые потери выработки солнечной ЭС от поверхностного загрязнения (пыль), кВт·ч; $\Delta \mathcal{E}_{\text{снег}}^{\text{год}}$ – годовые потери выработки солнечной ЭС от поверхностного загрязнения (снеговой покров), кВт·ч.

По выражению (3.25) производится расчет годовых потерь выработки солнечной ЭС от лесных пожаров:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{дым}}^{\text{год}} = \begin{cases} \Delta \mathcal{E}_{\text{дым}}^{\text{год}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{ФЭП}}^{\text{год}}}{365} \cdot n_{\text{дым}} \cdot \Delta_{\text{дым}} \\ \Delta_{\text{дым}} = \frac{\Delta_{\text{дым}}^{\text{малое}} + \Delta_{\text{дым}}^{\text{среднее}} + \Delta_{\text{дым}}^{\text{высокое}}}{3} = 0,558 \end{cases}, \quad (3.25)$$

где $n_{\text{дым}}$ – среднегодовое число дней с лесными пожарами, сут./год; $\Delta_{\text{дым}}$ – дополняющий коэффициент (показатель снижения генерирующей мощности солнечной ЭС при лесных пожарах), о.е. – 0,558; $\Delta_{\text{дым}}^{\text{малое}}$ – показатель снижения генерирующей мощности солнечной ЭС при лесных пожарах малой интенсивности, о.е.; $\Delta_{\text{дым}}^{\text{среднее}}$ – показатель снижения генерирующей мощности солнечной ЭС при лесных пожарах средней интенсивности, о.е.; $\Delta_{\text{дым}}^{\text{высокое}}$ – показатель снижения генерирующей мощности солнечной ЭС при лесных пожарах высокой интенсивности, о.е.

По выражению (3.26) производится расчет годовых потерь выработки солнечной ЭС от поверхностного загрязнения (пыль):

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{пыль}}^{\text{год}} = \begin{cases} \Delta \mathcal{E}_{\text{пыль}}^{\text{год}} = (\sum \mathcal{E}_{\text{ФЭП}}^{\text{лето}} + \sum \mathcal{E}_{\text{ФЭП}}^{\text{осень}}) \cdot \Delta_{\text{пыль.ЭЭ}} \\ \Delta_{\text{пыль.ЭЭ}} = \frac{\Delta_{\text{пыль.ЭЭ}}^5 + \Delta_{\text{пыль.ЭЭ}}^{10} + \Delta_{\text{пыль.ЭЭ}}^{15}}{3} = 0,114 \end{cases}, \quad (3.26)$$

где $\sum \mathcal{E}_{\text{ФЭП}}^{\text{лето}}$ – суммарная выработка солнечной ЭС в летний период, кВт·ч; $\sum \mathcal{E}_{\text{ФЭП}}^{\text{осень}}$ – суммарная выработка солнечной ЭС в осенний период, кВт·ч; $\Delta_{\text{пыль.ЭЭ}}$ – дополняющий коэффициент (показатель снижения генерирующей мощности солнечной ЭС при загрязнении поверхности ФЭП пылью), о.е. – 0,114; $\Delta_{\text{пыль.ЭЭ}}^5$ – показатель снижения генерирующей мощности солнечной ЭС при загрязнении поверхности ФЭП пылью на 5-ые сутки, о.е.; $\Delta_{\text{пыль.ЭЭ}}^{10}$ – показатель снижения

генерирующей мощности солнечной ЭС при загрязнении поверхности ФЭП пылью на 10-ые сутки, о.е.; $\Delta_{пыль.ЭЭ}^{15}$ – показатель снижения генерирующей мощности солнечной ЭС при загрязнении поверхности ФЭП пылью на 15-ые сутки, о.е.

По выражению (3.27) производится расчет годовых потерь выработки солнечной ЭС от поверхностного загрязнения (снеговой покров):

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{снег}}^{\text{год}} = \begin{cases} \Delta \mathcal{E}_{\text{снег}}^{\text{год}} = (\sum \mathcal{E}_{\text{ФЭП}}^{\text{зима}} + \sum \mathcal{E}_{\text{ФЭП}}^{\text{весна}}) \cdot \Delta_{\text{снег.ЭЭ}} \\ \Delta_{\text{снег.ЭЭ}} = \frac{\Delta_{\text{снег.ЭЭ}}^5 + \Delta_{\text{снег.ЭЭ}}^{10} + \Delta_{\text{снег.ЭЭ}}^{15}}{3} = 0,215\% \end{cases}, \quad (3.27)$$

где $\sum \mathcal{E}_{\text{ФЭП}}^{\text{зима}}$ – суммарная выработка солнечной ЭС в зимний период, кВт·ч; $\sum \mathcal{E}_{\text{ФЭП}}^{\text{весна}}$ – суммарная выработка солнечной ЭС в весенний период, кВт·ч; $\Delta_{\text{снег.ЭЭ}}$ – дополняющий коэффициент (показатель снижения генерирующей мощности солнечной ЭС при загрязнении поверхности ФЭП снеговым покровом), о.е. – 0,215; $\Delta_{\text{снег.ЭЭ}}^5$ – показатель снижения генерирующей мощности солнечной ЭС при загрязнении поверхности ФЭП снеговым покровом на 5-ые сутки, о.е.; $\Delta_{\text{снег.ЭЭ}}^{10}$ – показатель снижения генерирующей мощности солнечной ЭС при загрязнении поверхности ФЭП снеговым покровом на 10-ые сутки, о.е.; $\Delta_{\text{снег.ЭЭ}}^{15}$ – показатель снижения генерирующей мощности солнечной ЭС при загрязнении поверхности ФЭП снеговым покровом на 15-ые сутки, о.е.

Разработана математическая модель (Рисунок 3.36) оценки энергетического потенциала солнечной ЭС, учитывающая ключевые внешние факторы Севера. Данная модель зарегистрирована в ФИПС с получением государственных свидетельств [154–155].

Данная модель позволяет вычислить электроэнергетические и технико-экономические характеристики функционирования солнечных ЭС, учитывающих внешние факторы, с помощью которых достигается повышение точности расчетов со среднестатистическим отклонением не более 4,49% (Таблица 3.15).

На рисунке 3.37 представлен интерфейс разработанной математической модели, которая выполнена на базе лицензированной программы MS Office Excel.

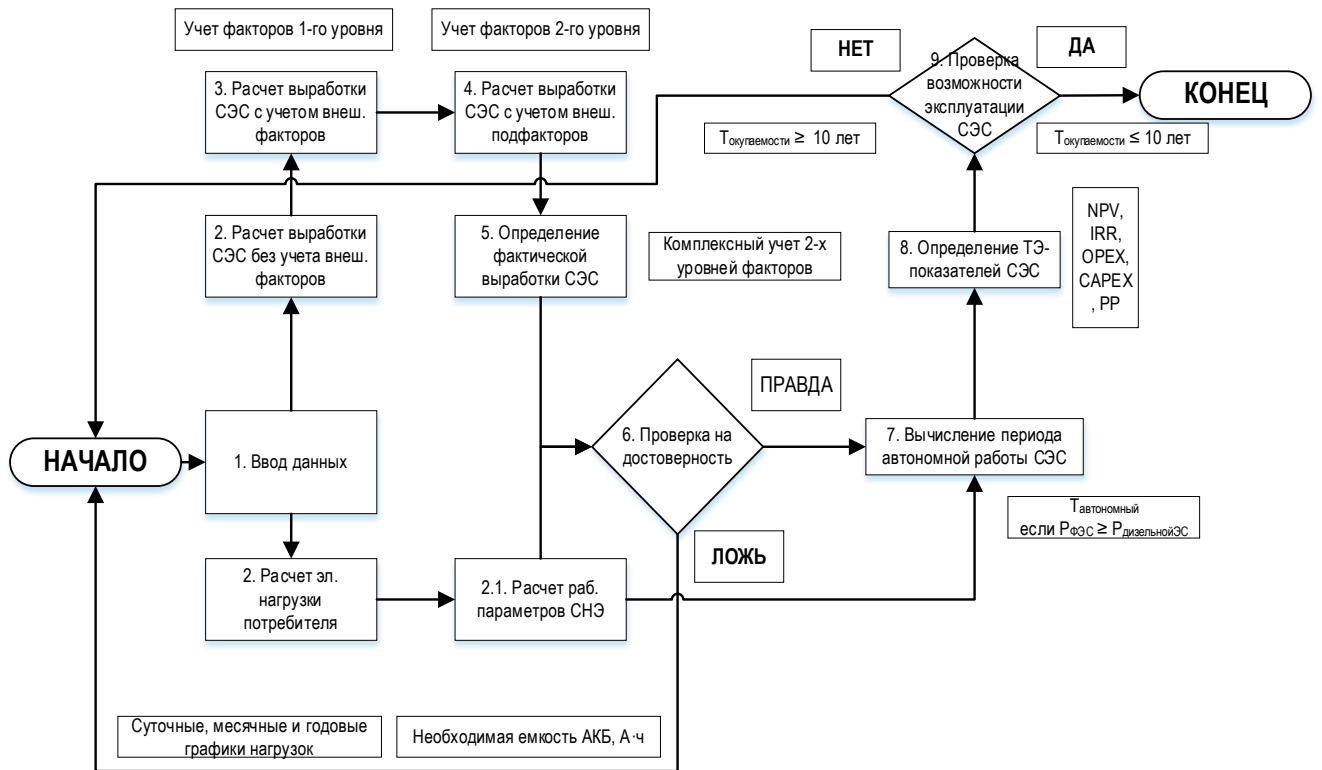


Рисунок 3.36 – Блок-схема алгоритма модели солнечной электростанции

Таблица 3.15 – Результаты оценки достоверности расчетов

№	Населенный пункт	Дельгей	Иннях	Куду-Кюель	Верхняя Амга	Улуу	Эйик
	Тип объекта						
1.	Установленная мощность, кВт	80	20	20	36	20	40
2.	Среднегодовая фактическая выработка, кВт·ч	74550,0	19582,0	17602,0	32421,0	20328,0	27824,0
3.	Расчетная выработка по основной методике, кВт·ч	81189,0	21451,0	19172,0	35381,0	22106,0	30568,0
4.	Расчетная выработка по основной методике с дополняющими коэффициентами, кВт·ч	77889,0	20478,0	18428,0	33824,0	21235,0	29050,0
5.	Относительное отклонение расчетов, %	8,9	9,5	8,9	9,1	8,7	9,9
6.	Относительное отклонение расчетов с дополняющими коэффициентами, %	4,5	4,6	4,7	4,3	4,5	4,4
7.	Среднее отклонение, %	9,18					
8.	Среднее отклонение с дополняющими коэффициентами, %	4,49					
9.	Уменьшение среднего отклонения, %	4,69					
10.	СКО, %	0,39					
11.	СКО с дополняющими коэффициентами, %	0,12					
12.	Уменьшение СКО, %	0,28					

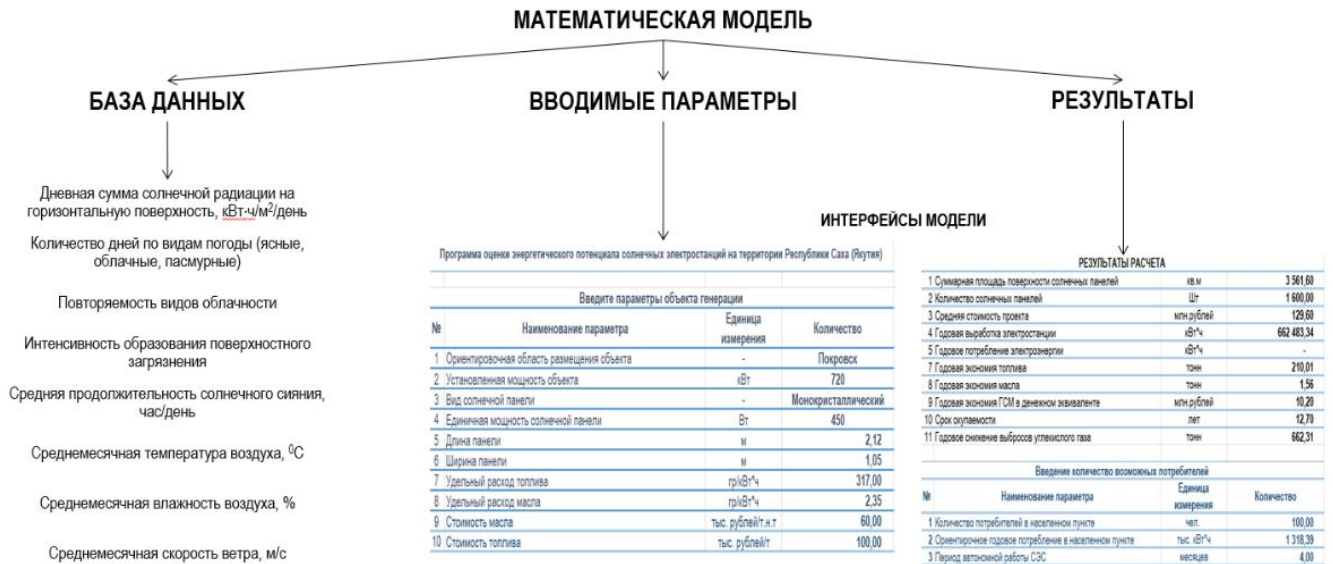


Рисунок 3.37 – Интерфейс разработанной математической модели

Интерфейс разработанной модели состоит из: база данных по внешним факторам; перечень вводимых параметров солнечной ЭС; результаты расчетов рабочих параметров солнечной ЭС.

3.9 Исследование способов повышения энергоэффективности солнечных электростанций

3.9.1 Способ защиты ФЭП от поверхностного загрязнения

Представлены результаты натуральных исследований о возможности применения способа защиты ФЭП от поверхностного загрязнения для солнечной ЭС [99]. Натурные исследования проведены на базе мобильного пункта полигона в центральной части Якутии. В соответствии с теорией планирования экспериментальных исследований [17, 30, 50] вычислено необходимое количество опытов по исследованию возможности применения покрытий для ФЭП по выражению (3.28):

$$N = P^K = 3^3 = 27, \quad (3.28)$$

где N – количество опытов, ед.; P – число уровней каждого фактора, ед.; K – число факторов, ед. Число уровней каждого фактора – 3, число факторов – 3 (Рисунок 2.8).

Натурные исследования по идентификации возможности применения способа защиты ФЭП от поверхностного загрязнения выполнены в соответствии с алгоритмом, представленным на рисунке 3.38. На рисунках 3.39, 3.40, 3.41, 3.42, 3.43 представлены внешние виды процедуры нанесения покрытий на поверхности ФЭП на основе силикона, спирта и воска.

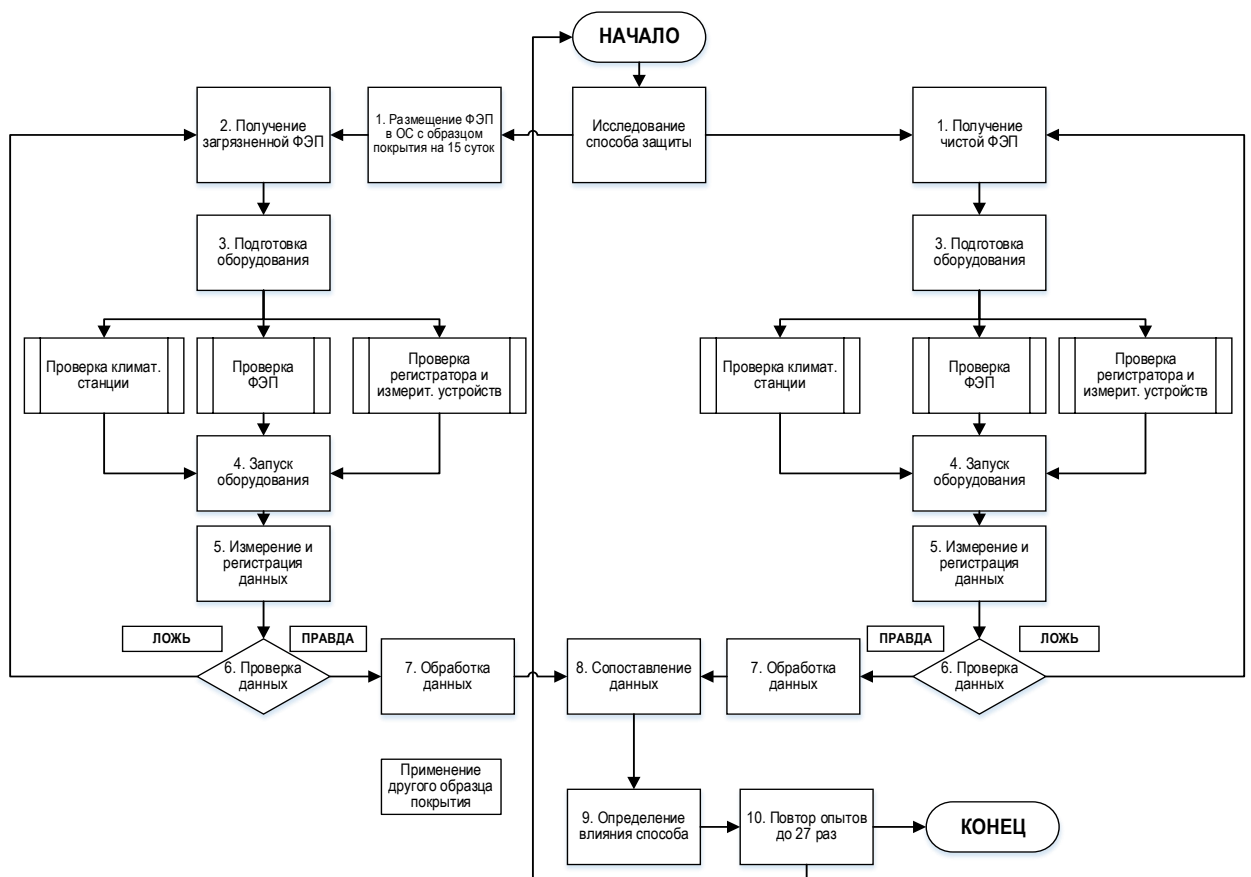


Рисунок 3.38 – Алгоритм выполнения натурных исследований



Рисунок 3.39 – Процедура нанесения покрытия на поверхность фотоэлектрической панели

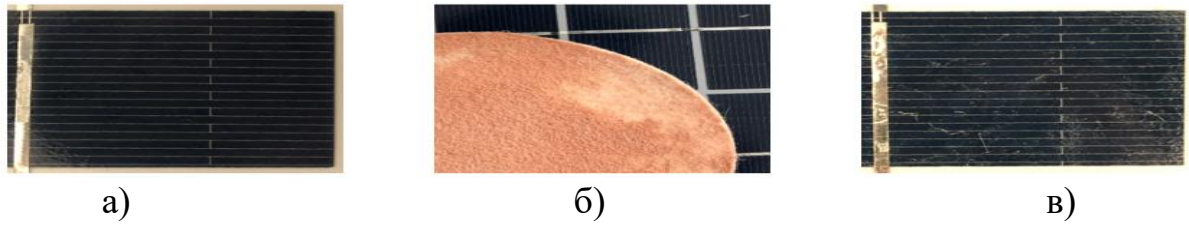


Рисунок 3.40 – Сравнение поверхностей панели (Покрытие 1 – силикон):
а) до нанесения; б) после нанесения; в) после размещения

Выполнен визуальный осмотр поверхностей ФЭП с тремя разными покрытиями на основе силикона, спирта и воска после 15 суток размещения в условиях сельской среды, где на рисунке 3.36–3.38 представлены внешние виды поверхностей ФЭП.

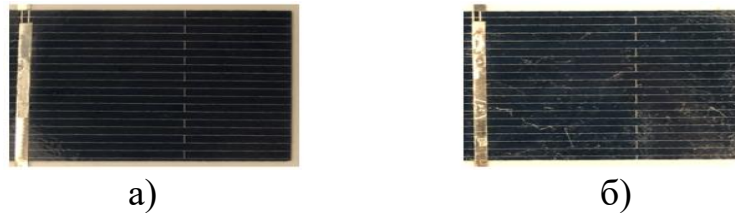


Рисунок 3.41 – Поверхность панели в случае применения на основе силикона:
а) после нанесения; б) после загрязнения

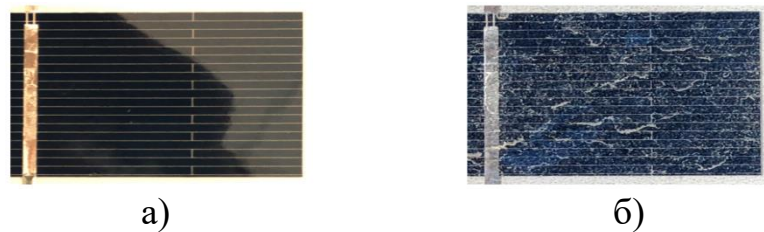


Рисунок 3.42 – Поверхность панели в случае применения на основе спирта:
а) после нанесения; б) после загрязнения



Рисунок 3.43 – Поверхность панели в случае применения на основе воска:
а) после нанесения; б) после загрязнения

Визуальный осмотр поверхности ФЭП установил, что после 15 суток размещения обработанной ФЭП в условиях сельской среды имеется высокая интенсивность образования поверхностного загрязнения. Покрытие на основе спирта (Рисунок 3.42) показало меньшую эффективность с указанием образования загрязнения на поверхности ФЭП. В случае применения покрытий на основе силикона и воска (Рисунки 3.41, 3.43) зафиксировано малое образование мелкодисперсных фракций пыли на поверхности ФЭП.

После проведения визуального осмотра необходимо выполнение исследования выработки электроэнергии от ФЭП с покрытием в сравнении с аналогичными ФЭП без нанесения покрытия после предварительного загрязнения в условиях окружающей среды. По выражению (3.29) выполнен учет закономерностей данного исследования:

$$\left\{ \begin{array}{l} P_i = f_i(t_m) \\ i = 3 \text{ вида} \\ 0 \leq t_m \leq 24 \text{ часов} \\ \Delta_{генер} = \left(1 - \frac{\int_0^{t_m} P_{исп} dt}{\int_0^{t_m} P_{чист.сп} dt} \right) \cdot 100\% \end{array} \right. , \quad (3.29)$$

где P_i – среднестатистическая генерирующая мощность обработанной ФЭП с применением i -го вида покрытия, Вт/Вт; i – вид покрытия, где 1 – силикон, 2 – спирт, 3 – воск; t_m – период исследования, ч; $P_{исп}$ – среднестатистическая генерирующая мощность обработанной ФЭП с применением i -го вида покрытия с поверхностным загрязнением, Вт/Вт; $P_{чист.сп}$ – среднестатистическая генерирующая мощность ФЭП с очищенной поверхностью, Вт/Вт; $\Delta_{генер}$ – доля снижения выработки электроэнергии от ФЭП, %.

На рисунке 3.44 представлены среднестатистические графики суточной выработки электроэнергии от ФЭП с применением предлагаемых покрытий при двух случаях – очищенная и загрязненная.

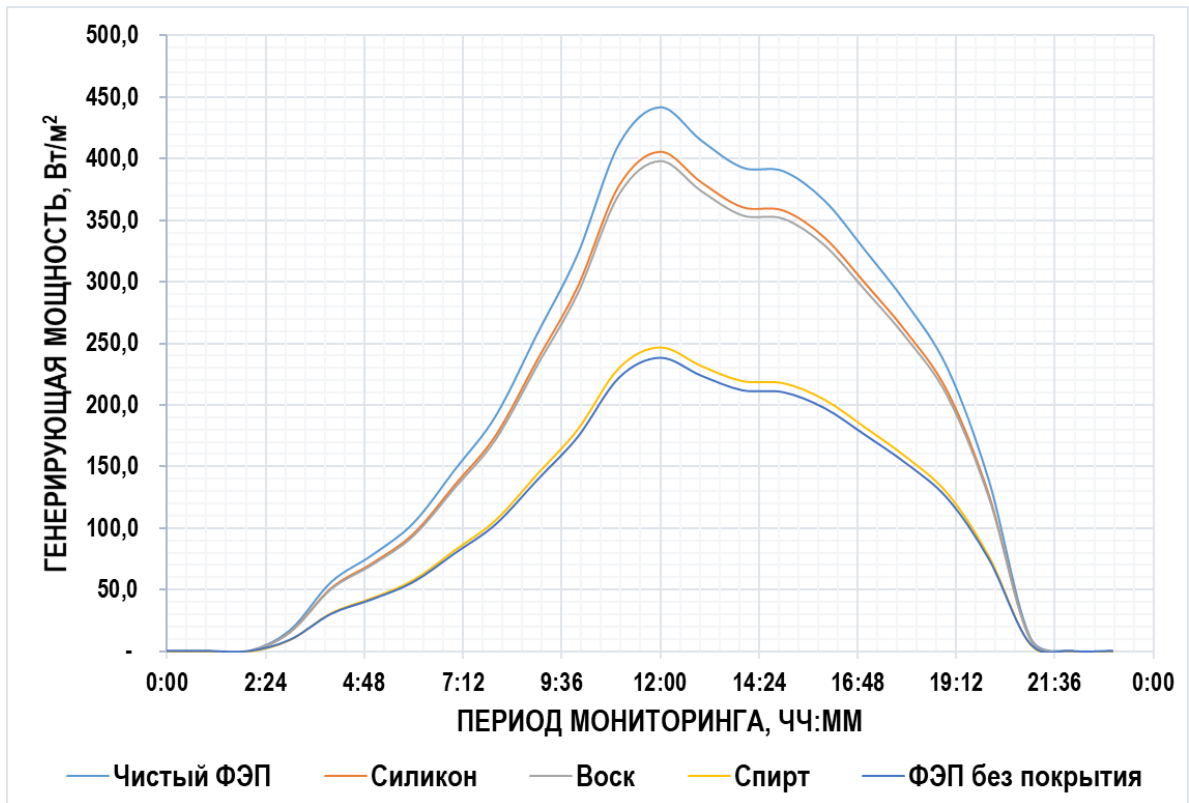


Рисунок 3.44 – Суточный мониторинг исследуемых панелей

Генерирующая мощность ФЭП вследствие применения покрытия на основе силикона уменьшается на 8,21%, что показывает эффективность защиты поверхности панели (Рисунок 3.41). В случае отсутствия дополнительных покрытий генерирующая мощность ФЭП уменьшается на 44...46% после 15 суток размещения в открытой среде. Генерирующая мощность ФЭП вследствие применения покрытия на основе спирта уменьшается на 44,15%, что показывает отсутствие эффективности защиты поверхности панели (Рисунок 3.42). Возможно, данное наблюдение объяснено тем, что покрытия на спиртовой основе быстрее улетучиваются в окружающей среде. Генерирующая мощность ФЭП вследствие применения покрытия на основе воска уменьшается на 9,90%, что показывает эффективность защиты поверхности панели (Рисунок 3.43). Все процедуры натуральных исследований велись при одинаковых условиях для каждого образца покрытия. В таблице 3.16 представлены результаты расчетов, выполненных в соответствии с выражением 3.24 с указанием показателей доли снижения общей выработки ФЭП [100].

Таблица 3.16 – Результаты суточного мониторинга

После 15 суток	Образец – 1	Образец – 2	Образец – 3
Состав покрытия	Силикон	Спирт	Воск
Снижение генерирующей мощности, %	-8,21 ±2,93	-44,15 ±2,93	-9,90 ±2,93
Недоотпуск электроэнергии, %	4,10	4,95	19,52

В связи с этим обоснована возможность применения разработанного способа для защиты ФЭП от негативного влияния поверхностного загрязнения. В рамках определения достоверности гипотезы снижения выработки ФЭП вследствие влияния различных видов облачности выполнен расчет t–критерия Стьюдента.

Период исследования ФЭП – 12 часов в условиях окружающей среды. Период шага исследования – 12 минут. Количество шагов исследования определено по выражению (3.30):

$$N = \frac{T}{K} = \frac{720}{12} = 60, \quad (3.30)$$

где N – количество шагов исследования, ед.; T – общий период исследования, 12,0 часов = 720 мин; K – период шага исследования, 12 мин.

Число степеней свободы определено по выражению (3.31):

$$\partial f = (N_1 + N_2) - j = (60 + 60) - 2 = 128, \quad (3.31)$$

где ∂f – число степеней свободы, ед.; N_1 – количество измерений с очищенной ФЭП (число выборки), 60 ед.; N_2 – количество измерений с обработанной, но загрязненной ФЭП (число выборки), 60 ед.; j – количество видов выборки, 2 ед.

Расчет значения t–критерия Стьюдента производится по алгоритму (Рисунок 3.11). В таблице 3.17 и на рисунке 3.45 представлены результаты обработки экспериментальных данных. В Приложении В (Таблица В.6) указаны детали данных расчетов.

Таблица 3.17 – Результаты обработки экспериментальных данных

№	Наименование параметра	В.1 $P_{\text{числ}}$, Вт/м ²	В.2 $P_{\text{отп}}$, Вт/м ²
1.	Среднеарифметическое значение	38,84	3,51
2.	Медиана	44,34	3,99
3.	Среднее отклонение	28,09	2,53

№	Наименование параметра	В.1 $P_{\text{чист}}$, Вт/м ²	В.2 $P_{\text{отп.}}$, Вт/м ²
4.	T–критерий Стьюдента	10,6	
Определение погрешности измерений			
5.	Средняя погрешность измерений, %	3,29	0,03
6.	Систематическая погрешность измерительных приборов, %	2,0	2,0
7.	Полная погрешность, %	3,85	2,02

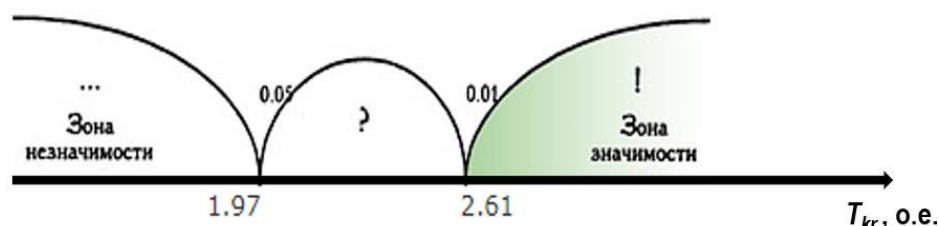


Рисунок 3.45 – Ось значимости гипотезы

T–критерий Стьюдента со значением 10,6 находится на промежутке уровня значимости $p \geq 0.01$ (Рисунок 3.45). Тем самым данный критерий находится в зоне значимости, объясняя достоверность обработанных экспериментальных данных.

3.9.2 Способ эффективного размещения фотоэлектрических панелей

В настоящий момент существуют следующие способы размещения ФЭП солнечных ЭС (Рисунок 3.46): линейное; изогнутое; трекерная установка. Однако в работе предложена реализация дугообразного способа размещения ФЭП, сущность которого заключается в «С» - образном размещении панелей относительно южной (солнечной) стороны.

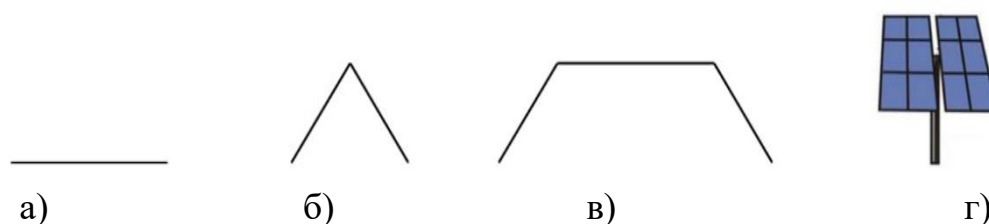


Рисунок 3.46 – Способы наземного размещения фотоэлектрических панелей:

а) линейное; б) изогнутое; в) дугообразное; г) трекерная установка

Выполнена оценка эффекта применения предлагаемого способа для солнечной ЭС установленной мощностью 30 кВт с применением лицензированного программного обеспечения «Global Solar Atlas». Оценка проведена путем

сопоставления со существующими способами размещения ФЭП. Результаты оценки представлены в таблице 3.18.

Таблица 3.18 – Результаты оценки на платформе «*Global Solar Atlas*»

Месяц	Выработка электроэнергии от солнечной ЭС по способам размещения, тыс. кВт·ч			
	Линейное	Дугообразное	Изогнутое	Трекер
Январь	1,20	1,14	1,12	1,20
Февраль	2,60	2,41	2,25	2,60
Март	4,00	3,82	3,78	5,36
Апрель	4,20	4,11	4,09	5,63
Май	4,00	4,49	4,19	5,70
Июнь	4,00	4,60	4,19	5,56
Июль	3,80	4,27	3,98	5,42
Август	3,40	3,37	3,35	4,56
Сентябрь	2,60	2,52	2,48	3,48
Октябрь	1,80	1,69	1,65	2,41
Ноябрь	1,40	1,30	1,30	1,40
Декабрь	1,00	0,89	0,86	1,00
Годовая выработка электроэнергии, тыс. кВт·ч	34,00	34,71	33,27	44,32
Летняя (май...июль) выработка электроэнергии, тыс. кВт·ч	11,80	13,46	12,37	16,68
Годовое увеличение выработки электроэнергии, %	0,00	+2,00	-2,14	+27,8
Летнее (май...июль) увеличение выработки электроэнергии, %	0,00	+14,07	+4,80	+41,4

Оценка эффекта применения способов размещения ФЭП показала, что наиболее значительное годовое и летнее (май...июль) увеличение выработки электроэнергии достигается с помощью трекерных установок на 27,8% и 34,0% соответственно. В зимний период (ноябрь...февраль) трекерные установки не могут функционировать по причине замерзания гидравлических элементов в сервоприводах при температуре менее -30°C . Капитальная стоимость трекерных установок выше в пять раз, чем линейное размещение солнечных ЭС.

Существует альтернативный вариант увеличения выработки солнечных ЭС – дугообразное и изогнутое размещение панелей. Из таблицы видно, что в течение летнего периода (май...июль) при дугообразном и изогнутом размещении ФЭП

солнечных ЭС достигнуто увеличение выработки электроэнергии на 12,37% и 4,80% соответственно.

По результатам расчетов на базе «*Global Solar Atlas*» определено, что в течение летнего периода рекомендовано временное применение дугообразного способа размещения ФЭП для солнечных ЭС микро мощности (не более 100 кВт \approx 660 м² площади ФЭП). При малых и крупных мощностях (более 100 кВт) сезонное изменение способа размещения ФЭП имеет высокие эксплуатационные издержки.

В целях определения достоверности результатов оценки способов размещения ФЭП солнечной ЭС проведены натурные исследования [39]. Исследования выполнены в центральной части Якутии по алгоритму, представленному на рисунке 3.47.

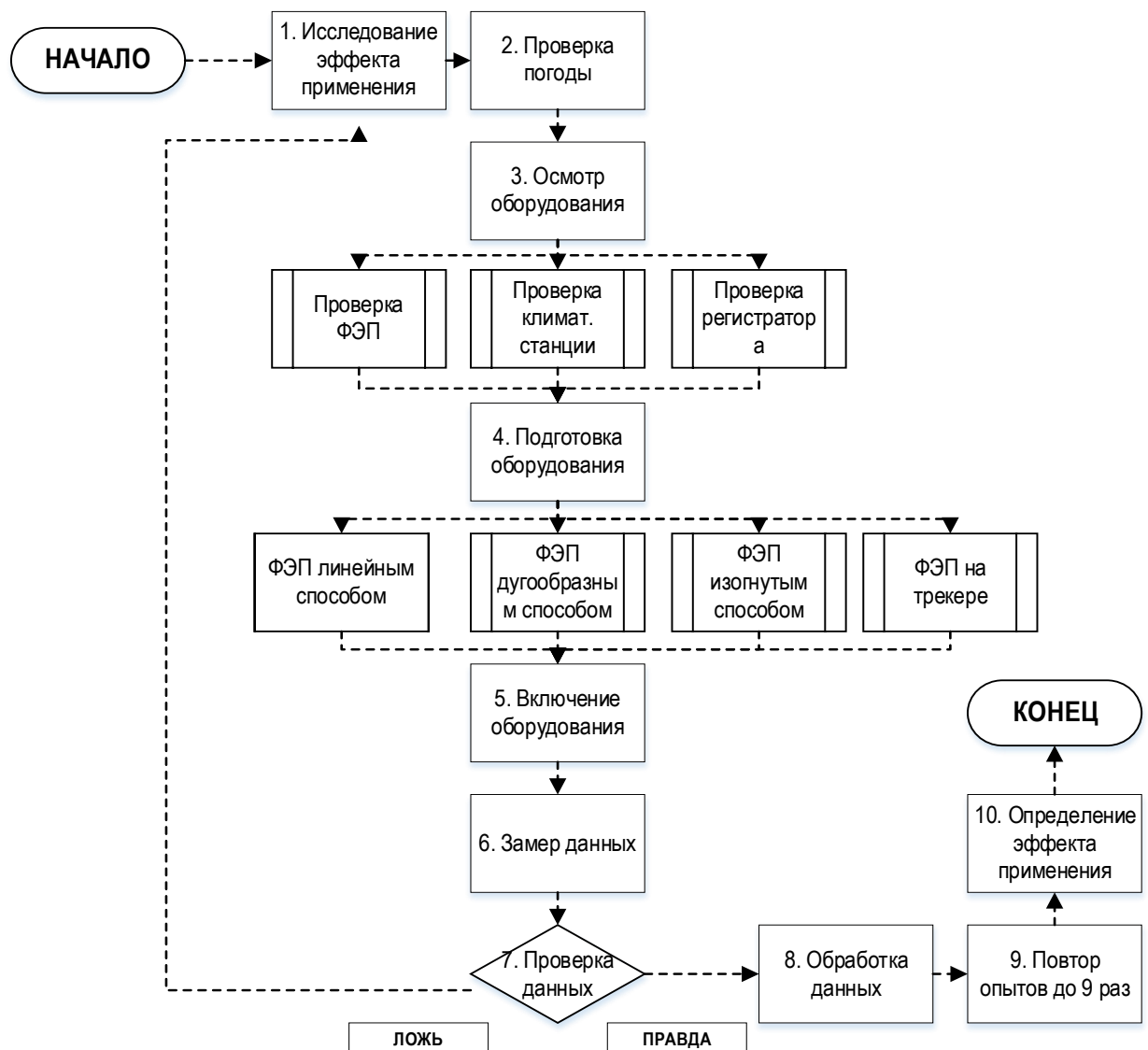


Рисунок 3.47 – Алгоритм выполнения натурных исследований

По теории планирования экспериментальных исследований [17, 30, 50] вычислено необходимое количество опытов по выражению (3.32) для исследования оптимального способа размещения ФЭП:

$$N = P^K = 3^2 = 9, \quad (3.32)$$

где N – количество опытов, ед.; P – число уровней каждого фактора, ед.; K – число факторов, ед. Число уровней каждого фактора – 3, число факторов – 2.

На рисунке 3.48 представлены внешние виды исследуемых способов размещения ФЭП для солнечных ЭС. Исследование функционирования ФЭП вышеуказанных способов размещения выполнено с учетом требований теории планирования экспериментальных исследований. На рисунке 3.49, 3.50 представлены графики выработки электроэнергии от исследуемых объектов.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.48 – Внешние виды способов наземного размещения панелей:

а) трекерная установка; б) трекер после запуска; в) ФЭП (спереди); г) ФЭП (сзади)

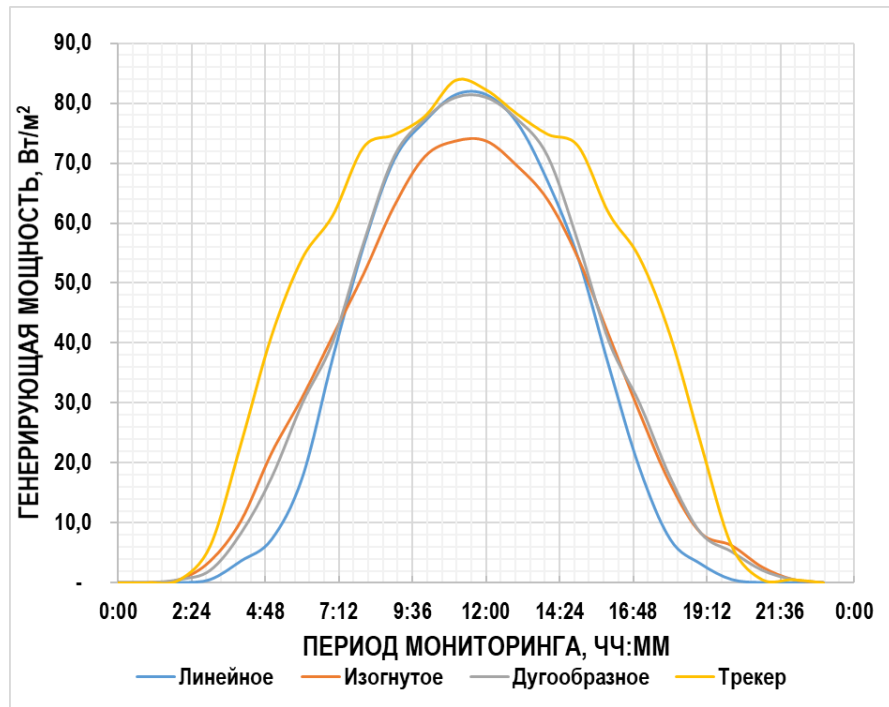


Рисунок 3.49 – Суточная выработка электроэнергии от солнечной электростанции при различных способах размещения фотоэлектрических панелей

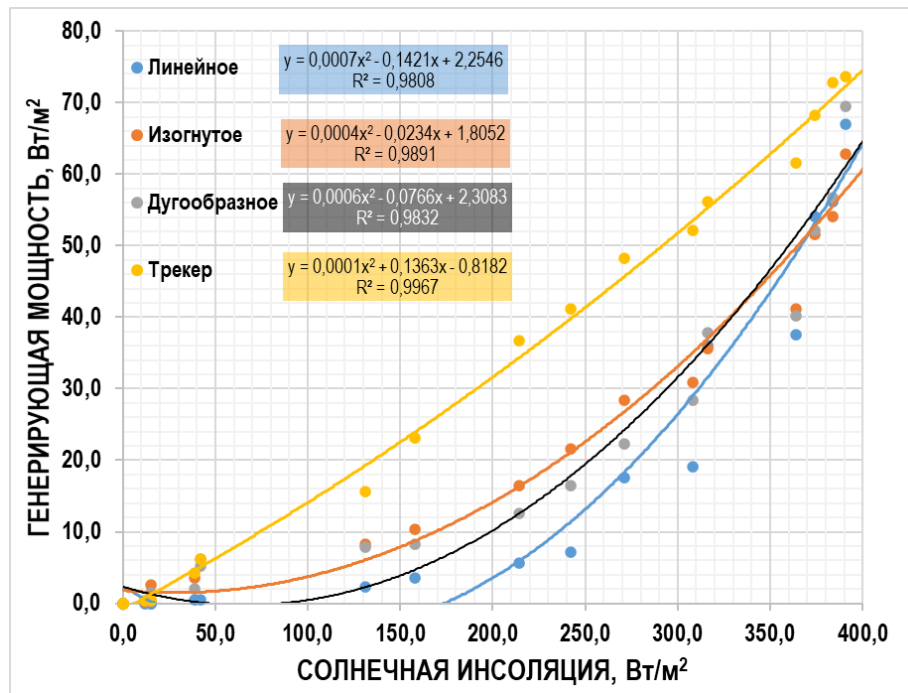


Рисунок 3.50 – Выработка электроэнергии от солнечной электростанции при различных способах размещения фотоэлектрических панелей

Дугообразное размещение ФЭП и трекерная установка в составе солнечной ЭС увеличивают выработку электроэнергии на 10,77% и 41,81% соответственно относительно линейного размещения панелей, а изогнутое – на 4,79%. По

результатам теоретических расчетов и натурных исследований (Таблицы 3.19, 3.20) установлено, что данное увеличение выработки достигается в течение летнего периода (май...июль).

Главным результатом натурных исследований является обоснование достоверности между расчетными и фактическими показателями выработки электроэнергии по различным способам размещения ФЭП солнечных ЭС.

Таблица 3.19 – Электроэнергетические показатели способов размещения

Период – май...июль	Способ размещения ФЭП			
	Линейное	Изогнутое	Дугообразное	Трекер
Кап. затраты, тыс.руб / кВт	100,00	120,00	120,0	600,0
Суточная выработка, Вт·ч/м ²	696,9	732,3	771,9	999,1
Увеличение выработки (факт.), %	0,0	+5,07	+10,77	+43,36
Увеличение выработки (расч.), %	0,0	+4,80	+14,07	+41,40
Относительная погрешность, %	0,0	±0,27	±3,30	±1,96

Таблица 3.20 – Изменение выработки электроэнергии от солнечной электростанции при различных способах размещения от солнечной инсоляции

№	Способ размещения ФЭП	Зависимость выработки электроэнергии от солнечной ЭС от инсоляции	Граничные условия
1.	Линейное	$P_{ФЭП}(T) = 0,0007 \cdot Q_s^2 - 0,1421 \cdot Q_s + 2,2546$ $R^2 = 0,9808$	$0 \leq Q_s \leq 400, \frac{Вт}{м^2}$ $R^2 > 0,95$
2.	Изогнутое	$P_{ФЭП}(T) = 0,0004 \cdot Q_s^2 - 0,0234 \cdot Q_s + 1,8052$ $R^2 = 0,9891$	
3.	Дугообразное	$P_{ФЭП}(T) = 0,0006 \cdot Q_s^2 - 0,0766 \cdot Q_s + 2,3083$ $R^2 = 0,9832$	
4.	Трекер	$P_{ФЭП}(T) = 0,0001 \cdot Q_s^2 + 0,1363 \cdot Q_s - 0,8162$ $R^2 = 0,9967$	

Относительная погрешность между данными показателями составила 0,2...1,4% и идентифицированы зависимости выработки электроэнергии по каждому способу размещения ФЭП в рамках приемлемых значений величины аппроксимации ($R^2 > 0,95$). Наибольшая выработка достигается в случае применения трекерных установок, но их капитальная стоимость выше в 5 раз при сравнении с остальными способами размещения ФЭП. В случае использования дугообразного размещения ФЭП достигается увеличение выработки на 10,77% в

течение только летнего периода. Таким образом, рекомендуется периодическое изменение способа размещения панелей в солнечных ЭС с линейного на дугообразное. На рисунке 3.51 представлена схема размещения ФЭП с применением данного способа для солнечной ЭС микромощности.

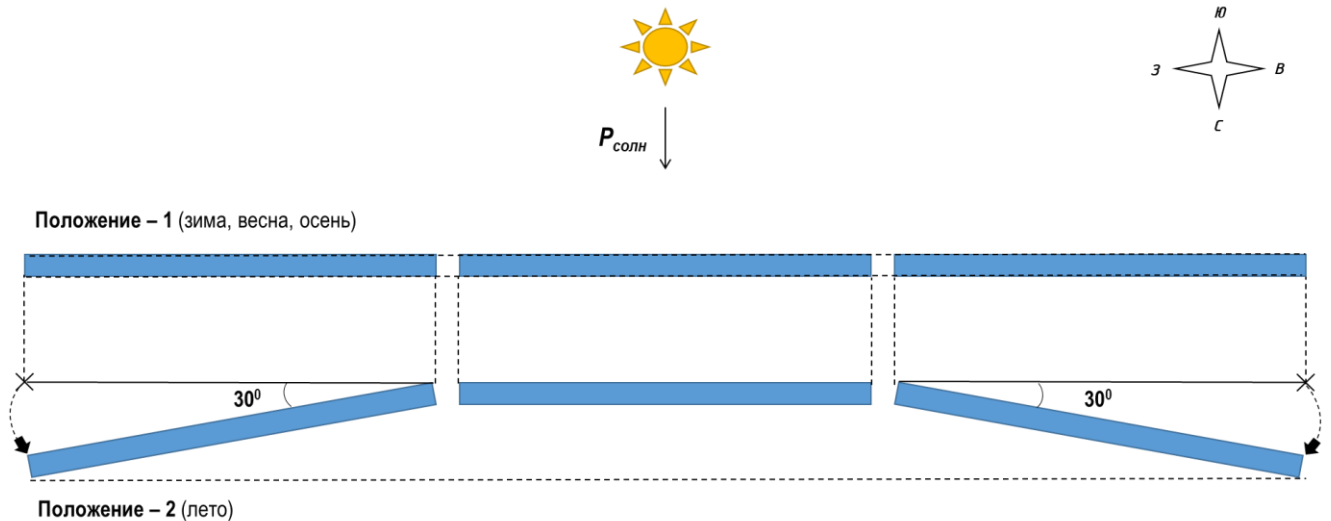


Рисунок 3.51 – Дугообразный способ размещения фотоэлектрических панелей солнечной электростанции (вид сверху)

Дугообразное размещение ФЭП в солнечных ЭС имеет следующие преимущества: низкие капитальные затраты; малая вероятность возникновения внештатных ситуаций; легкость в сезонном демонтаже и монтаже панелей.

Путем выполнения фундаментальных и прикладных исследований доказано, что годовая выработка электроэнергии солнечной ЭС с применением дугообразного способа размещения панелей выше на 10,77%, чем линейный способ в течение летнего периода.

Рассмотрен возможный пример применения дугообразного способа размещения ФЭП солнечной ЭС установленной мощностью 40 кВт в типовом населенном пункте на территории северной части РС(Я). Данная солнечная ЭС предназначена для компенсации выработки электроэнергии от локальной ДЭС на период весна...лето.

В качестве анализа выполнено сопоставление трех существующих способов размещения: дугообразное; линейное; трекерные установки. В солнечных ЭС РС(Я) эксплуатируются монокристаллические ФЭП, произведенные

предприятиями *Delta* (Китай), *SuntechPower* (Китай) и *Hevel Solar* (Россия). Для солнечных ЭС микро- и малой мощности применяются ФЭП единичной мощностью 380...450 Вт. В ходе данного анализа проведены геометрические расчеты площади размещения ФЭП солнечных ЭС с приведением технико-экономических показателей. Результаты анализа представлены в таблице 3.21.

Таблица 3.21 – Результаты технико-экономической оценки

№ п/п	Параметр	Ед. изм.	Способ размещения фотоэлектрических панелей		
			Дугообразное	Трекер	Линейное
1.	Установленная мощность	кВт	40,00		
2.	Срок службы без учета АКБ	лет	25,0	20,0	25,0
3.	Годовая выработка объекта	тыс. кВт·ч	46,1	58,9	41,6
4.	Годовая экономия дизельного топлива в топливном эквиваленте	тн	16,6	21,2	15,0
5.	Годовое уменьшение объемов выброса CO ₂		60,7	77,6	54,9
6.	Фактическая стоимость дизельного топлива	тыс. руб/тн	120,0		
7.	Годовая экономия топлива в денежном эквиваленте	тыс. руб	1992,0	2544,0	1802,0
8.	Удельная стоимость транспортировки комплектующих, строительства и оборудования	тыс. руб/кВт	250,0	750,0	250,0
9.	Суммарные капитальные расходы	тыс. руб	10000,0	30000,0	10000,00
10.	Годовая амортизация объекта		400,0	1500,0	400,0
11.	Годовой доход за счет экономии топлива и с учетом амортизации		1742,7	1044,4	1402,0
12.	Срок окупаемости	лет	5,7	28,7	7,1
13.	Удельная площадь размещения ФЭП	м ² /кВт	60,5	25,0	23,8

Из технико-экономической оценки видно, что наиболее целесообразным вариантом является сезонное применение дугообразного размещения ФЭП в солнечных ЭС по причине быстрого срока окупаемости – 5,7 лет и повышенной экономии топлива. Процедуры реализации данного способа размещения ФЭП имеют среднюю сложность по причине дугообразной ориентации панелей. Данный способ требует значительную площадь размещения, чем линейный способ размещения.

3.9.3 Способ повышения выработки двухсторонних фотоэлектрических панелей

Представлены результаты натурных исследований возможности применения способа повышения выработки электроэнергии от двухсторонних ФЭП солнечной ЭС [39]. Натурные исследования проведены в летне-осенний период в центральной Якутии, в рамках которых применялся определенный перечень фотоэлектрического, силового, регистрирующего и измерительного оборудования, в том числе двухсторонние ФЭП модели «*BST 300–24 M DUO*». По теории планирования экспериментальных исследований [17, 30, 50] вычислено необходимое количество опытов по выражению (3.33):

$$N = P^K = 2^4 = 16, \quad (3.33)$$

где N – количество опытов, ед.; P – число уровней каждого фактора, ед.; K – число факторов, ед. Число уровней каждого фактора – 2, число факторов – 4 (Рисунок 2.8).

В ходе планирования данных исследований предложено сопоставление перечня имитации поверхности относительно тыльной стороны ФЭП: специальное покрытие; асфальт; трава (газон); песок; мелкозернистый песок; снег.

Сущность специального покрытия заключается в применении покрытия на основе металлизированной полиэфирной пленки с напылением металла. Покрытие устанавливается на горизонтальную поверхность земли относительно тыльной стороны двухсторонней ФЭП для усиления отражения солнечного излучения. Специальное покрытие необходимо применить в случае отсутствия снега или льда для увеличения величины Альбедо (коэффициент отражения) – май...сентябрь.

Применены вспомогательные нагрузки с применением ламп накаливания мощностью до 300 Вт с возможностью регулирования нагрузки в ручном режиме и несущие конструкции для наземного размещения ФЭП с возможностью регулирования угла ее наклона. В течение периода исследования угол наклона ФЭП составил 30...45°. На рисунке 3.52 представлен внешний вид двухсторонних ФЭП на несущих конструкциях в ходе исследования.



а)



б)

Рисунок 3.52 – Внешний вид исследуемых двухсторонних фотоэлектрических панелей:

а) с имитацией поверхностей; б) со специальным покрытием

Исследование двухсторонних ФЭП произведено с учетом требований теории планирования экспериментальных исследований по алгоритму, представленному на рисунке 3.53. Исследование функционирования двухсторонних ФЭП проведено в условиях преимущественно безоблачной погоды и постоянной очистки поверхности ФЭП для снижения влияния внешних факторов – облачности и поверхностного загрязнения. На рисунках 3.54, 3.55 представлены результаты исследования электроэнергетических характеристик двухсторонних ФЭП по выражению (3.34):

$$P_{PV} = f(Q_S, i_{PV}) \quad P_{PV} = f(t_m, i_{PV}), \quad (3.34)$$

где Q_S – солнечная радиация, Вт/м²; i_{PV} – исследуемый цвет имитационной поверхности, от 1 до 5; P_{PV} – генерирующая мощность ФЭП на исследуемой имитационной поверхности относительно тыльной части ФЭП, Вт/м²; t_m – период исследования, ЧЧ: ММ.

В условиях преимущественно безоблачной погоды в середине светового дня двухсторонние ФЭП устойчиво выдают 70...80% своей установленной мощности. С изменением цветового тона нижней поверхности под панелью электроэнергетические характеристики исследуемых ФЭП подвергаются

значительным изменениям. Песочные, желтые, зеленые и черные тона нижней поверхности уменьшают генерирующую мощность ФЭП на 4...12% соответственно при сравнении с белыми тонами поверхности и поверхностью со специальным покрытием. В таблицах 3.22, 3.23 представлены основные результаты исследования особенностей функционирования цветных тонов ФЭП.

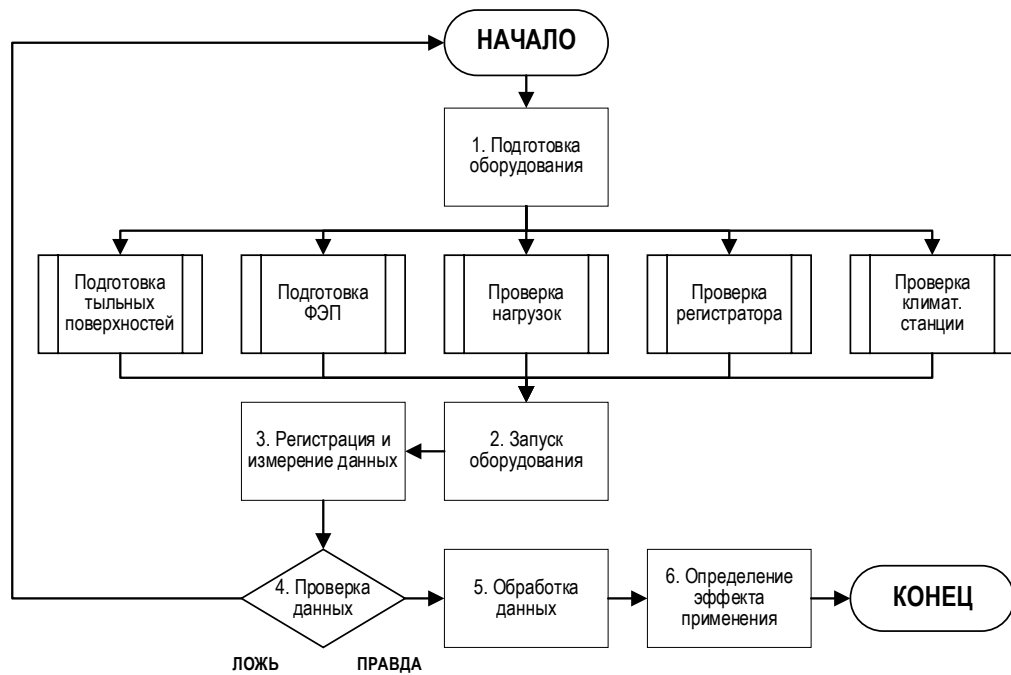


Рисунок 3.53 – Блок-схема алгоритма натурных исследований

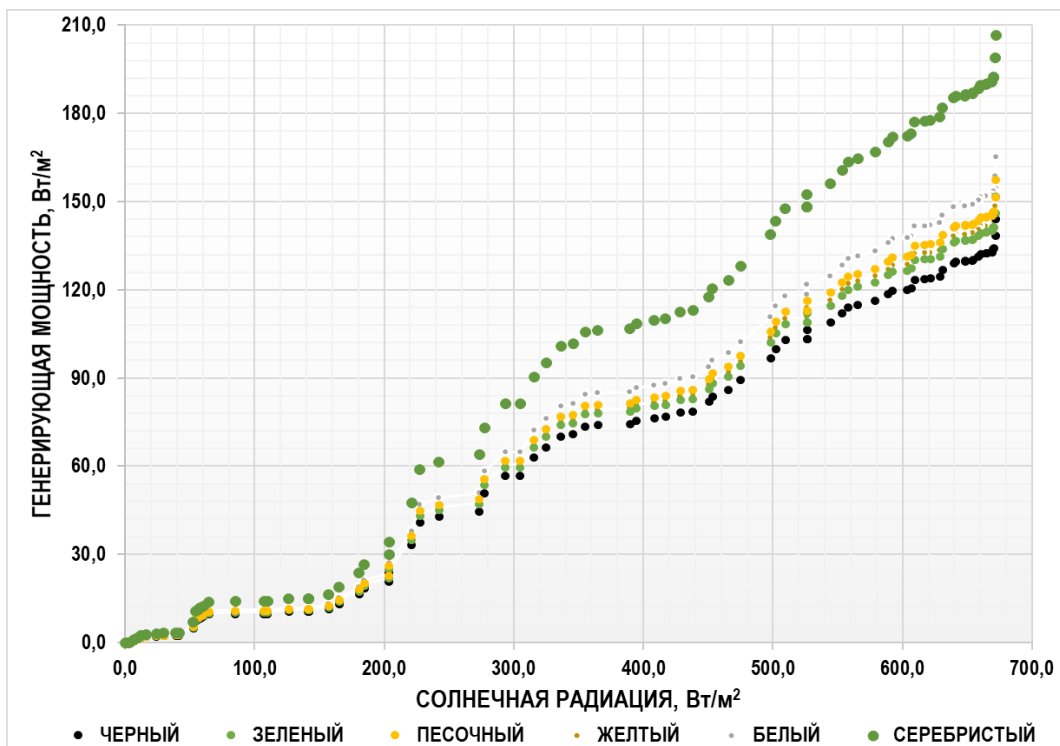


Рисунок 3.54 – Зависимость выработки фотоэлектрических панелей от инсоляции

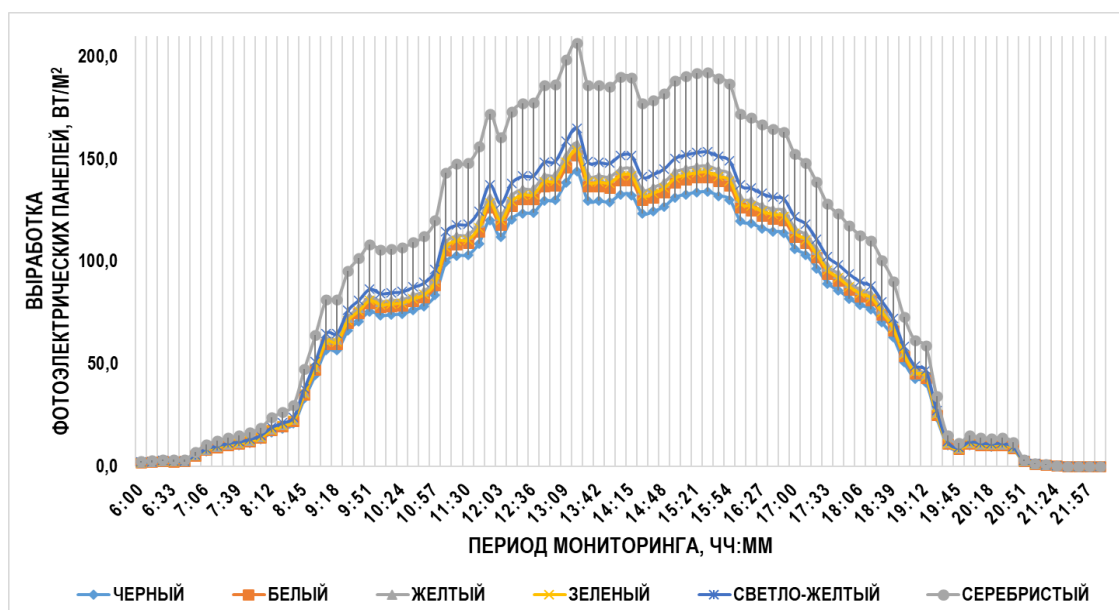


Рисунок 3.55 – Суточный график выработки фотоэлектрических панелей

Представлены показатели изменения выработки электроэнергии от двухсторонних ФЭП. Идентифицированы зависимости выработки электроэнергии ФЭП от солнечного излучения с указанием величины достоверности аппроксимации. Применение специального покрытия на основе металлизированной полиэфирной пленки с напылением металла или светлых тонов на нижней поверхности двухсторонних ФЭП для увеличения выработки электроэнергии является наиболее эффективным и целесообразным ввиду разницы по суточной выработке электроэнергии при сравнении с темными тонами (Таблицы 3.22, 3.23).

Таблица 3.22 – Электроэнергетические характеристики двухсторонних фотоэлектрических панелей при различных поверхностях

№	Цветовой тон относительно тыльной части ФЭП	Суточная выработка, кВт·ч	Увеличение выработки электроэнергии, %	Изменение тока, о.е.
1.	Специальное покрытие с дугообразным размещением	2,73	+33,2	1,33
1.	Специальное покрытие без дугообразного размещения	2,56	+25,2	1,25
2.	Белый	2,0	+0,0	1,00
3.	Песочный	1,95	-4,6	0,95
4.	Желтый	1,91	-6,6	0,92
5.	Зеленый	1,88	-8,1	0,89
6.	Черный	1,78	-12,8	0,85

Таблица 3.23 – Закономерности выработки фотоэлектрических панелей

№	Цветовой тон	Зависимость выработки электроэнергии ФЭП от солнечного излучения	Граничные условия
1.	Специальное покрытие	$P_{PV} = 8 \cdot 10^{-5} \cdot Q_s^2 + 0,2464 \cdot Q_s - 6,2061$ $R^2 = 0,9904$	$50 \leq Q_s \leq 700, \frac{Вт}{м^2}$ $R > 0,98$
2.	Белый	$P_{PV} = 7 \cdot 10^{-5} \cdot Q_s^2 + 0,1968 \cdot Q_s - 4,957$ $R^2 = 0,9904$	
3.	Песочный	$P_{PV} = 6 \cdot 10^{-5} \cdot Q_s^2 + 0,1839 \cdot Q_s - 4,6318$ $R^2 = 0,9904$	
4.	Желтый	$P_{PV} = 6 \cdot 10^{-5} \cdot Q_s^2 + 0,1877 \cdot Q_s - 4,7284$ $R^2 = 0,9904$	
5.	Зеленый	$P_{PV} = 6 \cdot 10^{-5} \cdot Q_s^2 + 0,181 \cdot Q_s - 4,5584$ $R^2 = 0,9904$	
6.	Черный	$P_{PV} = 6 \cdot 10^{-5} \cdot Q_s^2 + 0,1716 \cdot Q_s - 4,323$ $R^2 = 0,9904$	

Предполагается комплексное применение дугообразного размещения ФЭП и специального покрытия для увеличения энергоэффективности солнечной ЭС, где на рисунке 3.56 представлены схемы функционирования данных способов [40, 93].

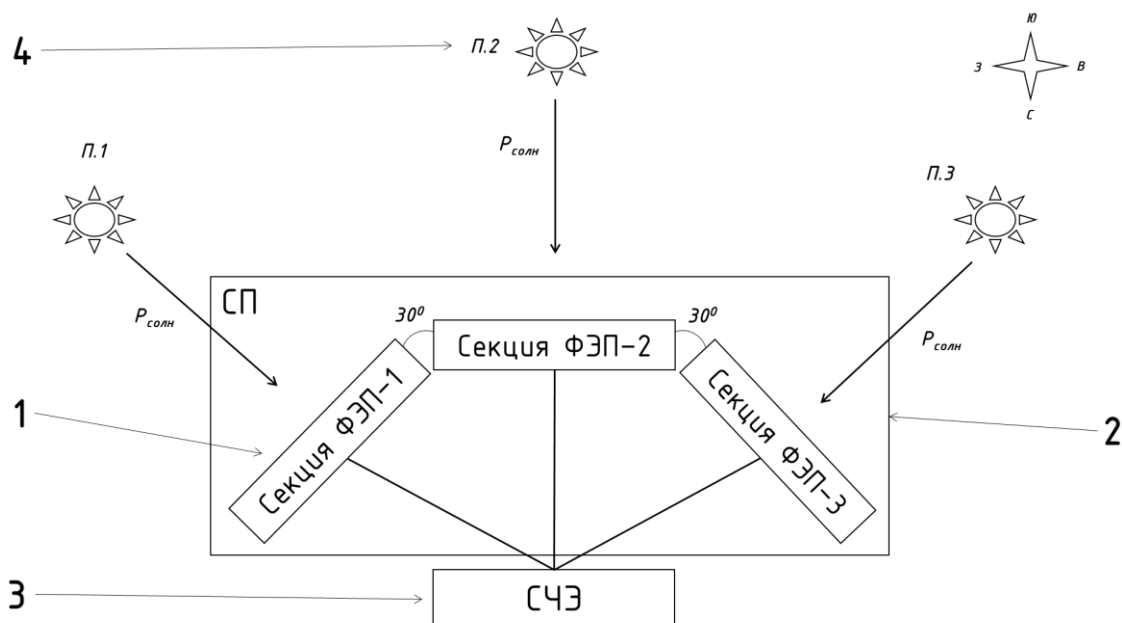


Рисунок 3.56 – Структурная схема способа повышения эффективности фотоэлектрических панелей:

где 1 – двухсторонние ФЭП; 2 – специальное покрытие; 3 – силовая часть электростанции; 4 – источник солнечного излучения

На основании вышеизложенного необходимо учесть, что при практическом применении разработанных способов рекомендуется комплексное применение дугообразного размещения двухсторонних ФЭП со специальным покрытием.

Выводы по третьей главе

1. Выполнено описание места и условий проведения натуральных исследований в целях идентификации характера и показателей влияния внешних факторов Севера на выработку электроэнергии от солнечной электростанции.

2. Разработаны алгоритмы проведения натуральных исследований, учитывающие требования теории планирования экспериментальных исследований в целях идентификации характера и показателей влияния внешних факторов Севера на выработку электроэнергии от солнечной электростанции.

3. Произведена идентификация характера и показателей влияния внешних факторов Севера на режимы работы солнечной электростанции с минимальным привлечением дизельной электростанции:

3.1. Исследованы характер и показатели влияния поверхностного загрязнения (мелкодисперсные фракции пыли) на функционирование солнечной электростанции в виде уменьшения выработки электроэнергии на 44...46% и получения общего недоотпуска электроэнергии до 19,75% в течение 15 суток.

3.2. Определены характер и показатели влияния поверхностного загрязнения (снеговой покров) на функционирование солнечной электростанции в виде уменьшения выработки электроэнергии на 12...79% и получения общего недоотпуска электроэнергии до 36,92% в течение 15 суток.

3.3. Идентифицированы характер и показатели влияния задымления воздушной среды, вызванной сезонными лесными пожарами, на функционирование солнечной электростанции в виде уменьшения выработки электроэнергии на 33,88...74,42% и получения общего недоотпуска электроэнергии до 37,21%.

3.4. Изучены характер и показатели влияния различных видов облачности на функционирование солнечной электростанции в виде уменьшения выработки электроэнергии на 8,03...95,18% и получения общего недоотпуска электроэнергии до 47,59% в зависимости от вида облачности.

3.5. Определены характер и показатели влияния теоретически возможного диапазона температуры окружающей среды ($-60...+60^{\circ}\text{C}$) на функционирование солнечной электростанции со следующими режимными показателями: при температуре окружающей среды в диапазоне $-60...+20^{\circ}\text{C}$ показатели выработки электроэнергии меняются в малой степени ($-3,28...-0,16\%$); при температуре окружающей среды в диапазоне $+30...+40^{\circ}\text{C}$ выработка электроэнергии уменьшается на 16,81% с последующим общим недоотпуском электроэнергии до 12,51%.

4. Разработана математическая модель оценки энергетического потенциала, расчета рабочих режимов, электроэнергетических и технико-экономических параметров солнечных электростанций, учитывающая идентифицированные показатели влияния внешних факторов. Учет влияния данных факторов позволил получить достоверные результаты расчетов со среднестатистическим отклонением не более 4,69% путем сопоставления с фактическими данными выработки электроэнергии от 6 реально функционирующих солнечных электростанций на территории Северо-Востока России.

5. Исследован эффект применения способа защиты фотоэлектрических панелей солнечной электростанции от негативного влияния поверхностного загрязнения (пыль и снег) [40], позволяющего уменьшить интенсивность образования слоя пыли или снегового покрова на фотоэлектрической панели и долю снижения выработки электроэнергии солнечной электростанции.

6. Определен эффект применения дугообразного способа размещения двухсторонних фотоэлектрических панелей солнечной электростанции с дополнительным использованием специального покрытия на основе металлизированной полиэфирной пленки с напылением металла относительно тыльной стороны панели [39, 93]. Данный способ позволяет увеличить выработку

электроэнергии от солнечной электростанции с двухсторонними фотоэлектрическими панелями на 33,2% с последующим уменьшением объемов потребления топлива в автономной энергосистеме.

7. Геометрически доказано, что дугообразный способ размещения двухсторонних фотоэлектрических панелей требует наличия значительных площадей земельного участка для солнечной электростанции. Произведена попытка оценки площадей размещения фотоэлектрических панелей на примере типовой солнечной электростанции микромощности, где установлено: дугообразный способ – 60,5 м²/кВт; линейный способ – 33,2 м²/кВт; трекерные установки – 23,8 м²/кВт.

ГЛАВА 4 ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ АВТОНОМНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ СПОСОБОВ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ

4.1 Постановка задачи

Энергоэффективность автономных энергосистем имеет значительную роль в их устойчивом функционировании. Под энергоэффективностью системы подразумевается расчет и оценка внедряемых мероприятий по следующим показателям [21, 66]: надежность; экологичность; экономичность.

- Надежность – это удовлетворение системы требованиям обеспечения электрических приемников бесперебойным питанием электроэнергией при регламентированном напряжении. Показатели безотказности и ремонтпригодности системы вычисляются в соответствии с требованиями расчета оперативных и технических показателей надежности.

В связи с этим в данной главе представлена оценка надежности автономной энергосистемы на северной части РС(Я). Задача решается с помощью существующих закономерностей на базе теории надежности энергосистем. Разработан алгоритм и порядок выполнения расчетов оперативной и технической надежности в системе автономной энергосистемы, учитывающие возможные варианты модернизации оцениваемой системы. Предложены пять возможных вариантов развития автономной энергосистемы: Вариант 1 – ДЭС; Вариант 2 – ДЭС с интеграцией сетевой солнечной электростанции; Вариант 3 – ДЭС с интеграцией сетевой солнечной электростанции и применением разработанных способов; Вариант 4 – ДЭС с интеграцией автономной/гибридной солнечной электростанции; Вариант 5 – ДЭС с интеграцией автономной/гибридной солнечной электростанции и применением разработанных способов.

Предполагается формирование полноценного анализа показателей надежности автономной энергосистемы, учитывающее возможность применения солнечных ЭС и использования разработанных способов для ФЭП.

4.2 Идентификация базовых параметров объекта оценки надежности автономной энергосистемы

Оценка показателей надежности в рамках модернизации исследуемой энергосистемы выполнена в виде пяти возможных вариантов модернизации (Рисунок 4.1). Объектом данной оценки принята автономная энергосистема на базе ДЭС в с. Мачах (Северный энергорайон РС(Я)) суммарной установленной мощностью 90 кВт (зимний максимум – 75 кВт; летний минимум – 37 кВт) [21, 113], в которой эксплуатируются 3 ДГУ установленной мощностью – 90 кВт (Рисунок 4.2), располагаемой мощностью – 25 кВт (АД–30С, ДЭУ–30).

На период 2024–2030 гг. запланирована модернизация вышеуказанного объекта посредством внедрения технологий ВИЭ для достижения следующих задач: уменьшение общего недоотпуска электроэнергии; уменьшение эксплуатационных затрат; уменьшение выбросов CO₂ в окружающую среду; увеличение экономии горюче-смазочных материалов; увеличение надежности объекта.

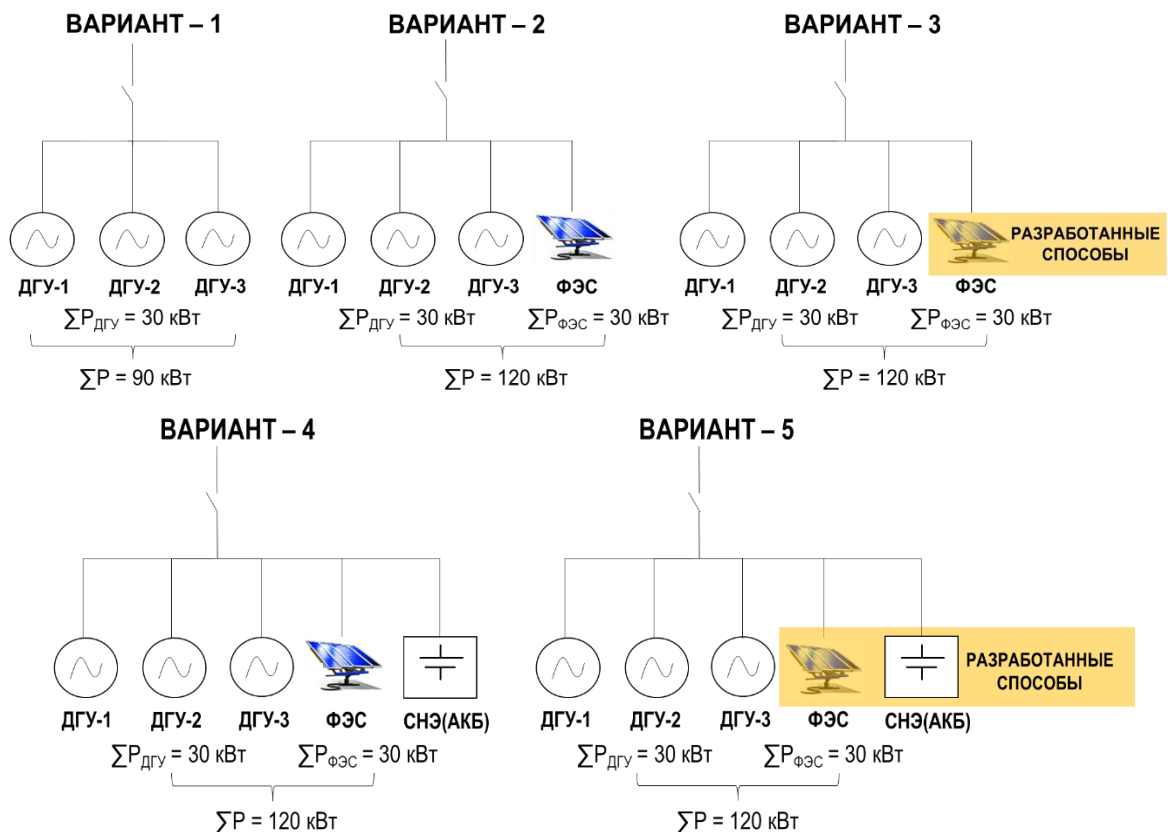


Рисунок 4.1 – Варианты модернизации автономной энергосистемы в с. Мачах

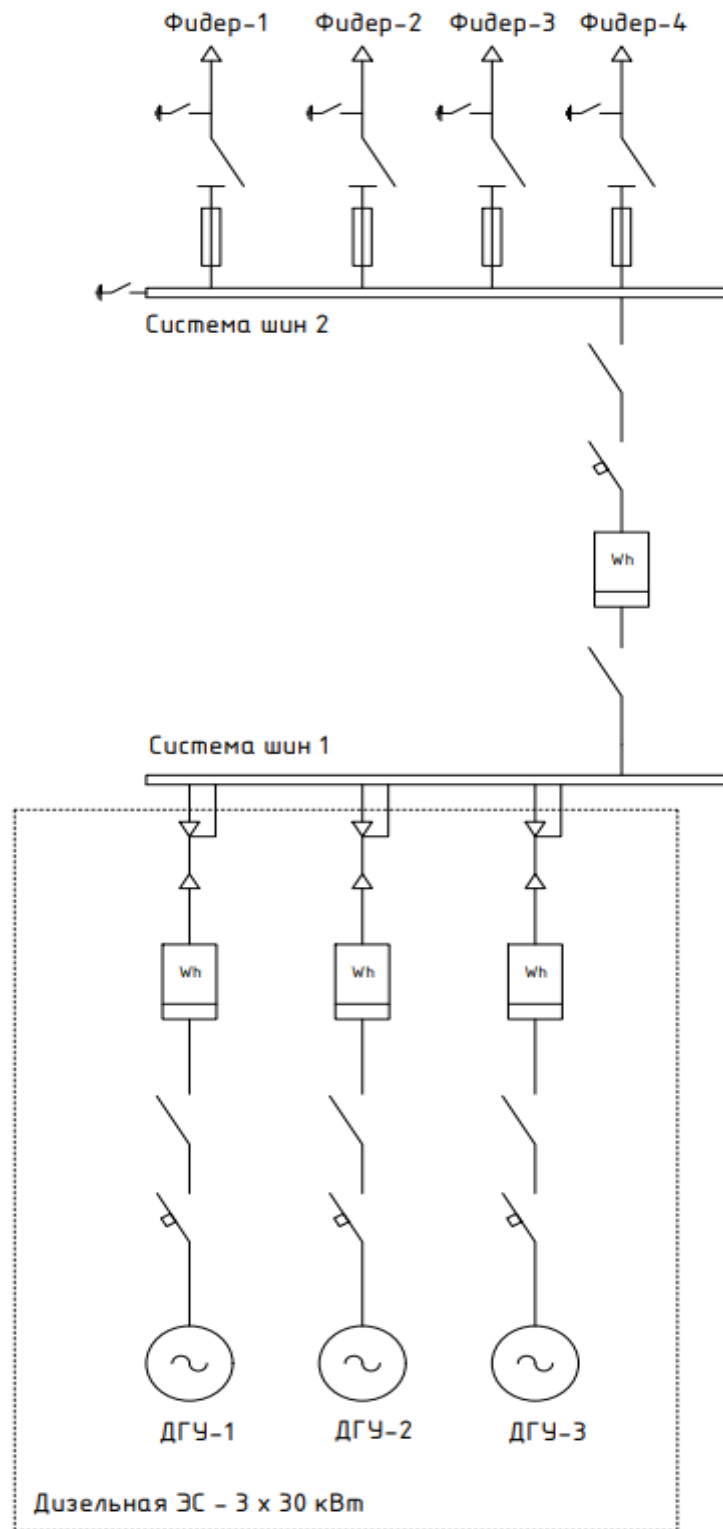


Рисунок 4.2 – Упрощенная принципиальная схема автономной энергосистемы в с. Мачах

Необходимо заметить, что рассматриваемая энергосистема представляет собой совокупность трех дизель-генераторных установок с возможностью увеличения установленной мощности самой системы.

4.3 Алгоритм идентификации показателей надежности автономной энергосистемы

Расчет показателей надежности автономной энергосистемы выполнен посредством проведения вычисления оперативных и технических показателей надежности с учетом возможных вариантов его модернизации. Расчет данных показателей производится в соответствии с действующими правилами и требованиями, отраженными в источниках [20, 27, 28, 147, 148]. На рисунке 4.3 представлен алгоритм идентификации показателей надежности автономной энергосистемы.

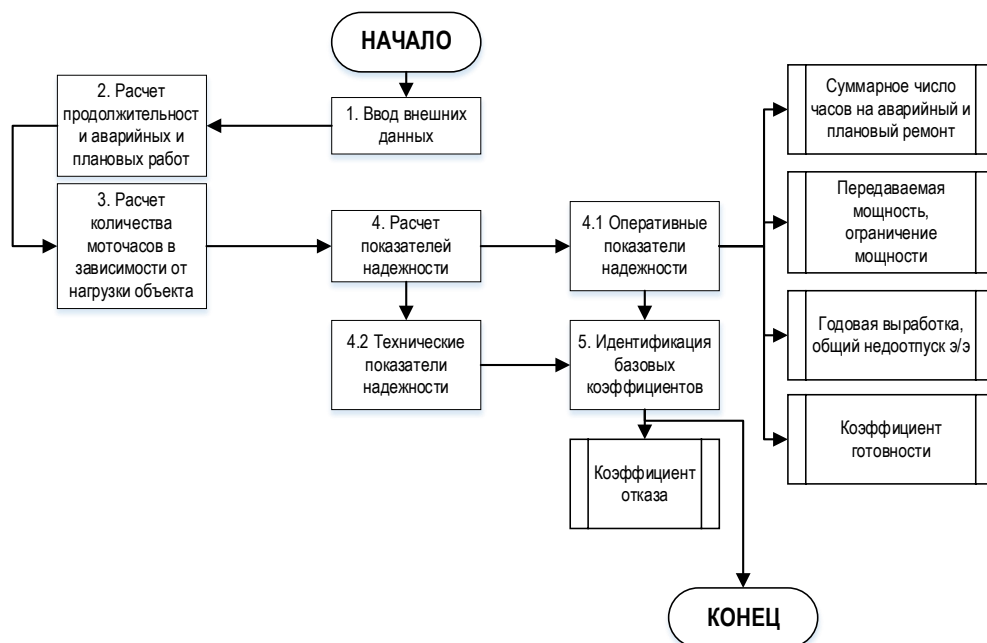


Рисунок 4.3 – Блок-схема алгоритма идентификации показателей надежности автономной энергосистемы

Алгоритм имеет следующий цикл функционирования:

1. Ввод внешних данных объекта с учетом разделения по элементам: период эксплуатации, количество часов эксплуатации, число дней аварийного и планового ремонта.
2. Расчет продолжительности аварийных и плановых ремонтов.
3. Расчет количества моточасов в зависимости от графиков нагрузки элементов автономной энергосистемы.

4. Расчет показателей надежности.

4.1. Оперативные показатели надежности.

4.1.1. Суммарное количество часов на аварийный и плановый ремонт вычисляется на основании месячных показателей из п. 2.

4.1.2. Передаваемая мощность и ограничение мощности вычисляются по выражениям (4.1) – (4.2) соответственно:

$$P_n = K_z \cdot P_{уст}, \quad (4.1)$$

$$P_{огр} = P_n - P_{уст.э}, \quad (4.2)$$

где K_z – коэффициент загрузки, принимается как 0,9; $P_{уст}$ – установленная мощность объекта, кВт; $P_{уст.э}$ – установленная мощность элементам объекта, кВт.

4.1.3. Годовая выработка электроэнергии и ее общий недоотпуск вычисляются по выражениям (4.3) – (4.4) соответственно:

$$P_{\Sigma \text{выр}} = 24 \cdot (P_{\max} \cdot t_{\text{зимний}} + P_{\min} \cdot t_{\text{летний}}), \quad (4.3)$$

$$P_{\Sigma \text{недоотпуск}} = P_{огр} \cdot n_{\Sigma \text{аварий}}, \quad (4.4)$$

где P_{\max} – зимний максимум нагрузки на объект, кВт; P_{\min} – летний минимум нагрузки на объект, кВт; $t_{\text{зимний}}$ – зимний период эксплуатации, до 270 дней; $t_{\text{летний}}$ – летний период эксплуатации, до 90 дней; $P_{огр}$ – ограничение мощности в объекте при аварийной ситуации, кВт; $n_{\Sigma \text{аварий}}$ – суммарный период плановых и аварийных ремонтов, сутки.

4.1.4. Коэффициент готовности вычисляется по выражению (4.5):

$$K_r = \frac{t_p}{t_p + t_n}, \quad (4.5)$$

где t_p – время пребывания объекта в рабочем состоянии, ч.; t_n – время вынужденного простоя, ч.

4.1.5. Коэффициент вынужденного простоя по аварийным и плановым ремонтам вычисляется по выражениям (4.6) – (4.7) соответственно:

$$K_{01} = \frac{t_{01}}{t}, \quad (4.6)$$

$$K_{02} = \frac{t_{e2}}{t}, \quad (4.7)$$

где t_{e1} – время пребывания объекта в режиме аварийного ремонта, ч.; t_{e2} – время пребывания объекта в режиме планового ремонта, ч.; t – число часов в году, 8640 ч.

5. Расчет базовых коэффициентов надежности:

5.1. Коэффициент отказов вычисляется по каждому элементу объекта по выражению (4.8):

$$k_{ok} = \frac{r_k}{r_{\Sigma}}, \quad (4.8)$$

где r_k – число отказов системы из-за элементов k -го типа; r_{Σ} – общее число отказов системы за исследуемый промежуток времени.

5.2. Коэффициент относительного простоя вычисляется по каждому элементу объекта по выражению (4.9):

$$k_{ok}' = \frac{T_{BK}}{T_{B\Sigma}}, \quad (4.9)$$

где T_{BK} – число часов аварийного ремонта определенного элемента объекта, ч.; $T_{B\Sigma}$ – общее число часов аварийного ремонта объекта, ч.

С применением вышеуказанного алгоритма вычисляются показатели надежности исследуемой энергосистемы.

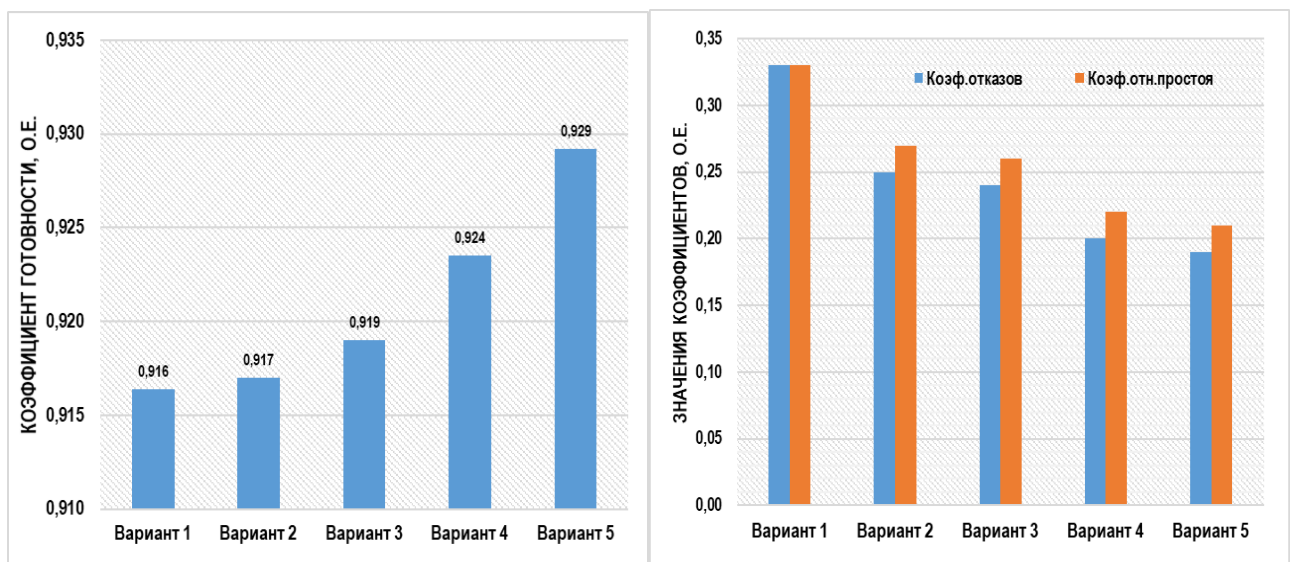
4.4 Результаты расчетов показателей надежности исследуемой автономной энергосистемы

Расчеты показателей надежности автономной энергосистемы выполнены на базе лицензированной программы MS Office Excel с применением статистической модели (Рисунок 4.3) и выражений (4.1) – (4.12). Данные расчеты выполнены по пяти вариантам модернизации автономной энергосистемы (Рисунок 4.1). В таблице 4.1 и на рисунке 4.4 представлены результаты расчетов по вышеуказанным показателям надежности.

Таблица 4.1 – Результаты расчетов показателей надежности исследуемой автономной энергосистемы

Показатели	Вариант I	Вариант II	Вариант III	Вариант IV	Вариант V
Комплектация	ДЭС	ДЭС–ФЭС	ДЭС–ФЭС–способы	ДЭС–ФЭС–АКБ	ДЭС–ФЭС–АКБ–способы
Общий недоотпуск электроэнергии, %	6,01	4,34	3,58	3,89	3,13
Коэф. готовности, о.е.	0,916	0,917	0,919	0,924	0,929
Вероятность отказов, о.е.	0,33	0,25	0,24	0,20	0,19
Вероятность безотказной работы, о.е.	0,67	0,75	0,76	0,80	0,81

Оценка недоотпуска электроэнергии с учетом разделения по вариантам показал, что ввод солнечной ЭС или солнечной ЭС с системой накопления энергии при синхронизации с ДЭС позволит уменьшить недоотпуск электроэнергии на 1,67% и 2,12% соответственно. Применение способов повышения энергоэффективности (далее – способы ЭЭФ) (§3.8.1–3.8.3) в технологическом цикле солнечной ЭС и ДЭС позволит уменьшить недоотпуск электроэнергии на 2,43%, а при наличии системы накопления энергии – на 2,88%.



а)

б)

Рисунок 4.4 – Коэффициент готовности по вариантам оценки:

а) коэффициент готовности; б) коэффициенты отказов и простоя

Ввод солнечной ЭС или солнечной ЭС с системой накопления энергии при интеграции с ДЭС позволит увеличить коэффициент готовности на 0,001 о.е. и 0,008 о.е. соответственно. Применение способов повышения ЭЭФ в технологическом цикле солнечной ЭС и солнечной ЭС с системой накопления энергии при интеграции с ДЭС позволит увеличить коэффициент готовности на 0,003 о.е. и 0,013 о.е. соответственно.

Ввод солнечной ЭС или солнечной ЭС с системой накопления энергии при интеграции с ДЭС (Рисунок 4.5) позволит уменьшить вероятность отказов на 0,08 о.е. и 0,13 о.е. соответственно. Применение способов повышения ЭЭФ в технологическом цикле солнечной ЭС и солнечной ЭС с системой накопления энергии при интеграции с ДЭС позволит уменьшить вероятность отказов на 0,09 о.е. и 0,14 о.е. соответственно.

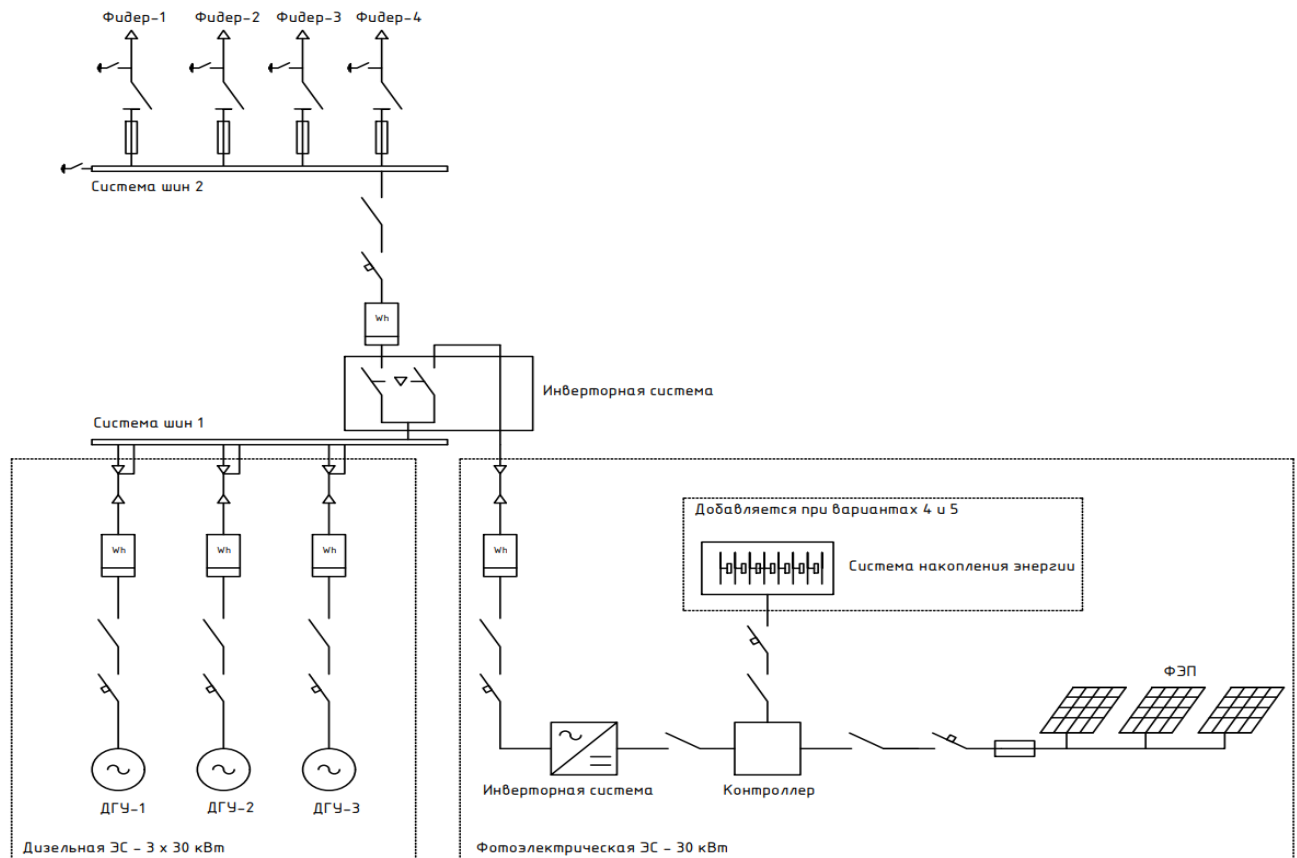


Рисунок 4.5 – Предложенная принципиальная схема автономной энергосистемы в с. Мачах после модернизации

В результате определения показателей надежности автономной энергосистемы рекомендуется выполнение модернизации посредством

строительства солнечной ЭС при наличии системы накопления энергии с применением способов повышения ЭЭФ (Вариант – 5) при интеграции с ДЭС ввиду: уменьшения недоотпуска электроэнергии на 2,88%; увеличения коэффициента готовности объекта на 0,013 о.е.; увеличения вероятности безотказной работы на 0,14 о.е.

Выводы по четвертой главе

1. Выполнена оценка эффекта применения разработанных способов солнечной электростанцией в автономной энергосистеме в с. Мачах (северная Якутия) и определены ключевые показатели надежности автономной энергосистемы.

2. Описан алгоритм идентификации показателей надежности автономной энергосистемы с. Мачах с солнечной электростанцией, позволяющий вычислить показатели оперативной и технической надежности.

3. Выполнена оценка показателей надежности автономной энергосистемы в с. Мачах по следующим вариантам: Вариант 1 – дизельной электростанции; Вариант 2 – дизельной электростанции с интеграцией солнечной электростанции; Вариант 3 – дизельной электростанции с интеграцией солнечной электростанции и применением разработанных способов; Вариант 4 – дизельной электростанции с интеграцией автономной/гибридной солнечной электростанции; Вариант 5 – дизельной электростанции с интеграцией автономной/гибридной солнечной электростанции и применением разработанных способов.

4. Определен наиболее эффективный вариант модернизации рассмотренной в качестве примера автономной энергосистемы с. Мачах посредством интеграции солнечной электростанции с системой накопления энергии и применением разработанных способов со следующим показателями надежности: уменьшение недоотпуска электроэнергии на 2,88%; увеличение коэффициента готовности объекта на 1,42%; увеличение вероятности безотказной работы на 20,89%.

ГЛАВА 5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРЕДЛАГАЕМЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

5.1 Постановка задачи

Ранее было указано, что энергоэффективность автономных энергосистем оценивается по трем параметрам: надежность; экологичность; экономичность. В предыдущей главе успешно проведена оценка надежности автономной энергосистемы до и после применения предложенных технических мероприятий. В данной главе выполняется оценка по двум оставшимся параметрам – экономичность и экологичность.

- Экономичность – это удовлетворение системы к требованиям минимальных затрат на ее создание, эксплуатацию и развитие с достижением незначительного срока окупаемости.

- Экологичность – это удовлетворение системы требованиям поэтапного перехода к ключевым целевым показателям декарбонизированной электроэнергетики.

В связи с этим в настоящей главе представлены технико-экономическая и экологическая оценки автономной энергосистемы с. Мачах для определения порядка применения разработанных способов повышения энергоэффективности солнечных ЭС. Способ 1 – это разработанный способ защиты ФЭП электростанций от поверхностного загрязнения. Способ 2 – это разработанный способ размещения ФЭП электростанций, в том числе с применением светоотражающих покрытий. Задача решается с помощью общеизвестных закономерностей в области электроэнергетики, экологии и экономики. Разработаны алгоритм и порядок выполнения технико-экономической и экологической оценки автономной энергосистемы, имеющей солнечную ЭС с четырьмя вариантами применения разработанных способов: Вариант 1 – без применения разработанных способов; Вариант 2 – с применением разработанного способа 1; Вариант 3 – с применением

разработанного способа 2; Вариант 4 – комплексное применение двух разработанных способов.

Предполагается формирование полноценного анализа технико-экономических и экологических показателей функционирования автономной энергосистемы, имеющей солнечную ЭС, а также оценка среднегодовых и среднесуточных графиков выработки электроэнергии от рассматриваемой энергосистемы. Под экологическими показателями предполагается расчет уменьшения выбросов CO_2 вследствие сокращения объемов потребления горюче-смазочных материалов ДЭС при обязательном наличии выработки от солнечной ЭС.

5.2 Алгоритм идентификации показателей технико-экономического обоснования модернизации автономной энергосистемы

Вычисление показателей технико-экономического обоснования модернизации автономной энергосистемы выполняется посредством расчетов капитальных и операционных затрат. Расчет данных показателей производится в соответствии с действующими правилами и требованиями [149, 150, 194]. На рисунке 5.1 представлен алгоритм идентификации показателей технико-экономического обоснования модернизации автономной энергосистемы при внедрении солнечной ЭС с учетом применения разработанных способов повышения ЭЭФ.

Технико-экономическое обоснование внедрения способов повышения ЭЭФ солнечной ЭС при параллельном функционировании с автономной энергосистемой выполнено (Рисунок 5.1) посредством применения методов расчета срока окупаемости, учитывающего ставку дисконтирования [31, 104, 191] в соответствии с формулами (5.1) – (5.10):

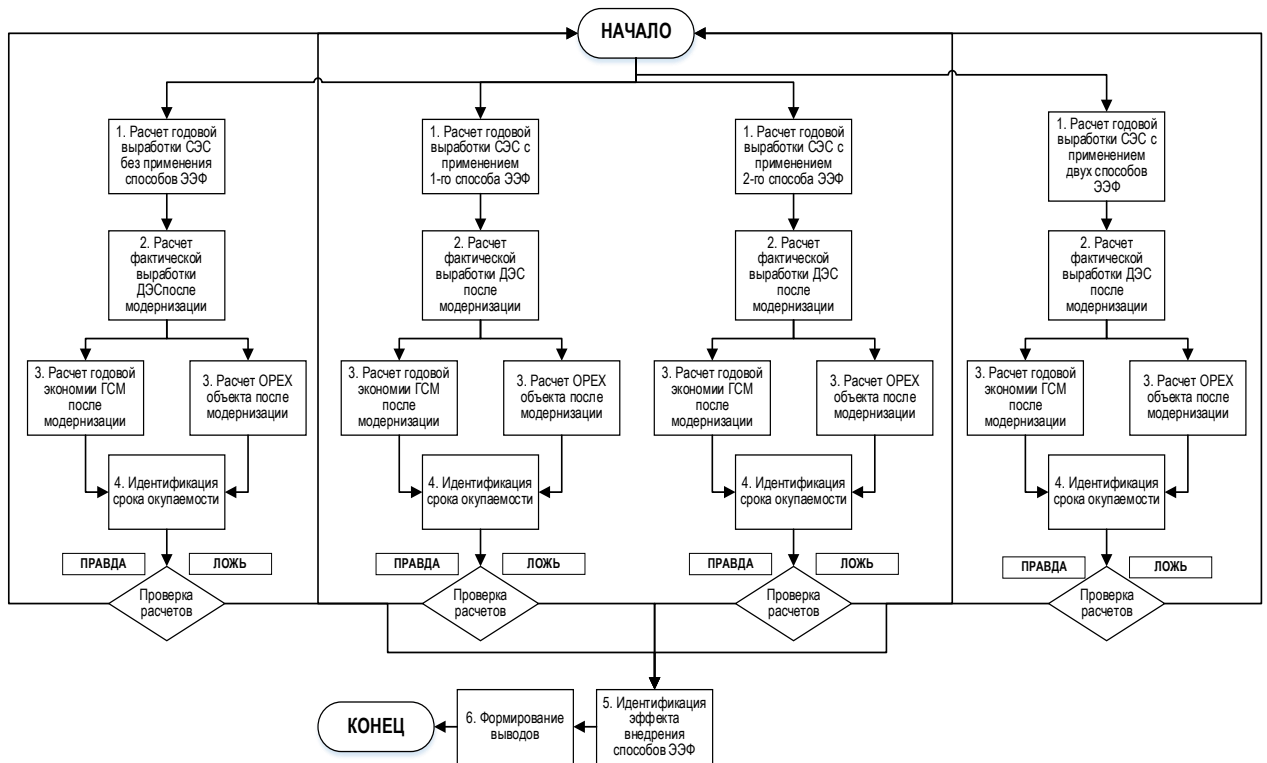


Рисунок 5.1 – Блок-схема алгоритма идентификации показателей технико-экономического обоснования модернизации автономной энергосистемы

1. Капитальные затраты на внедрение солнечной ЭС вычисляются в рамках модернизации объекта посредством применения разработанной математической модели (§3.8).

2. Годовая выработка солнечной ЭС с и без применения способов повышения ЭЭФ вычисляется посредством применения разработанной математической модели (§3.8).

3. Фактическая годовая выработка объекта автономной энергосистемы после ее модернизации вычисляется по выражению (5.1):

$$P_{\Sigma\text{факт.ДЭС}} = P_{\Sigma\text{годоваяДЭС}} - P_{\Sigma\text{расч.СЭС}}, \quad (5.1)$$

где $P_{\Sigma\text{годоваяДЭС}}$ – фактическая годовая выработка ДЭС до ее модернизации, кВт·ч;
 $P_{\Sigma\text{расч.СЭС}}$ – расчетная годовая выработка солнечной ЭС после внедрения в ДЭС, кВт·ч.

4. Годовая экономия дизельного топлива после модернизации автономной энергосистемы вычисляется по выражению (5.2):

$$M_{\Sigma ДТ} = U_{ДТ.ДЭС} \cdot P_{\Sigma расч.СЭС} \cdot 10^{-6}, \quad (5.2)$$

где $U_{ДТ.ДЭС}$ – удельный расход дизельного топлива в объекте, гр./кВт·ч; $P_{\Sigma расч.СЭС}$ – расчетная годовая выработка солнечной ЭС после внедрения в ДЭС, кВт·ч.

5. Годовая экономия моторного масла после модернизации автономной энергосистемы вычисляется по выражению (5.3):

$$M_{\Sigma ДМ} = U_{ДМ.ДЭС} \cdot P_{\Sigma расч.СЭС} \cdot 10^{-3}, \quad (5.3)$$

где $U_{ДМ.ДЭС}$ – удельный расход моторного масла в объекте, мл/кВт·ч.

6. Годовая экономия ГСМ в денежном эквиваленте после модернизации автономной энергосистемы вычисляется по выражению (5.4):

$$\mathcal{E}_{\Sigma ГСМ} = M_{\Sigma ДТ} \cdot C_{ДТ} + M_{\Sigma ДМ} \cdot C_{ДМ}, \quad (5.4)$$

где $M_{\Sigma ДТ}$ – годовая экономия дизельного топлива, т.н.т.; $M_{\Sigma ДМ}$ – годовая экономия моторного масла, л.; $C_{ДТ}$ – стоимость дизельного топлива, 100...150 тыс. руб/т.н.т.; $C_{ДМ}$ – стоимость моторного масла, 0,6 тыс. руб/л.

7. Годовые операционные издержки автономной энергосистемы в рамках модернизации вычисляются по выражению (5.5):

$$ОРЕХ = Z_{Р.ДЭС} + Z_{СП.ЭЭФ}, \quad (5.5)$$

где $Z_{Р.ДЭС}$ – затраты на плановый ремонт ДЭС, млн. руб; $Z_{СП.ЭЭФ}$ – затраты на внедрение и устойчивое функционирование предлагаемых способов, млн. руб.

8. Годовые операционные издержки на предлагаемые способы вычисляются по выражению (5.6):

$$Z_{СП.ЭЭФ} = (Q_1 + Q_2) \cdot 10^{-3}, \quad (5.6)$$

где Q_1 – годовые издержки на приобретение основного применяемого материала (покрытия), тыс. рублей; Q_2 – годовые издержки на приобретение вспомогательных материалов и принимается как 400,00 тыс. рублей.

9. Ключевой статьёй в окупаемости проектов строительства солнечных ЭС на территории Севера является экономия ГСМ (дизельное топливо и моторное масло).

10. Годовой доход модернизации автономной энергосистемы вычисляется по выражению (5.7):

$$D_{\Sigma} = \mathcal{E}_{\Sigma ГСМ} + \mathcal{E}_{Р.ДЭС}, \quad (5.7)$$

где $\mathcal{E}_{\Sigma ГСМ}$ – годовая экономия ГСМ в денежном эквиваленте, тыс. руб.; $\mathcal{E}_{Р.ДЭС}$ – годовая экономия средств вследствие уменьшения объема плановых ремонтов ДЭС, тыс. руб.

11. Дисконтированный срок окупаемости модернизации автономной энергосистемы вычисляется по выражению (5.8):

$$DPP = \sum_{t=1}^n \frac{D_{\Sigma}}{(1+r)^t}, \quad (5.8)$$

где r – ставка дисконтирования, о.е.; n – дисконтированный срок окупаемости, лет.; D_{Σ} – годовой доход модернизации ДЭС, тыс. руб.; t – рассматриваемый период, лет.

12. Разница годовой экономии дизельного топлива в рамках модернизации автономной энергосистемы при различных вариантах внедрения предлагаемых способов вычисляется по выражению (5.9):

$$\Delta M_i^{ДТ} = M_{\Sigma ДТ}^i - M_{\Sigma ДТ}', \quad (5.9)$$

где $M_{\Sigma ДТ}^i$ – годовая экономия дизельного топлива при i -м варианте, т.н.т.; $M_{\Sigma ДТ}'$ – годовая экономия дизельного топлива без применения предлагаемых способов, т.н.т.; i – применение 1-го, 2-го или двух предлагаемых способов.

13. Разница годовой экономии моторного масла в рамках модернизации автономной энергосистемы при различных вариантах внедрения предлагаемых способов вычисляется по выражению (5.10):

$$\Delta M_i^{ДМ} = M_{\Sigma ДМ}^i - M_{\Sigma ДМ}', \quad (5.10)$$

где $M_{\Sigma ДМ}^i$ – годовая экономия моторного масла при i -м варианте, т.н.т.; $M_{\Sigma ДМ}'$ – годовая экономия моторного масла без применения предлагаемых способов, т.н.т.; i – применение первого, второго или двух предлагаемых способов.

5.3 Алгоритм идентификации эффекта внедрения предлагаемых способов на окружающую среду

Экологическая оценка внедрения способов повышения ЭЭФ солнечной ЭС выполнена с применением метода расчета уменьшения выброса CO_2 [102, 139], где на рисунке 5.2 представлен алгоритм идентификации данного эффекта с применением закономерностей (5.11) – (5.12).

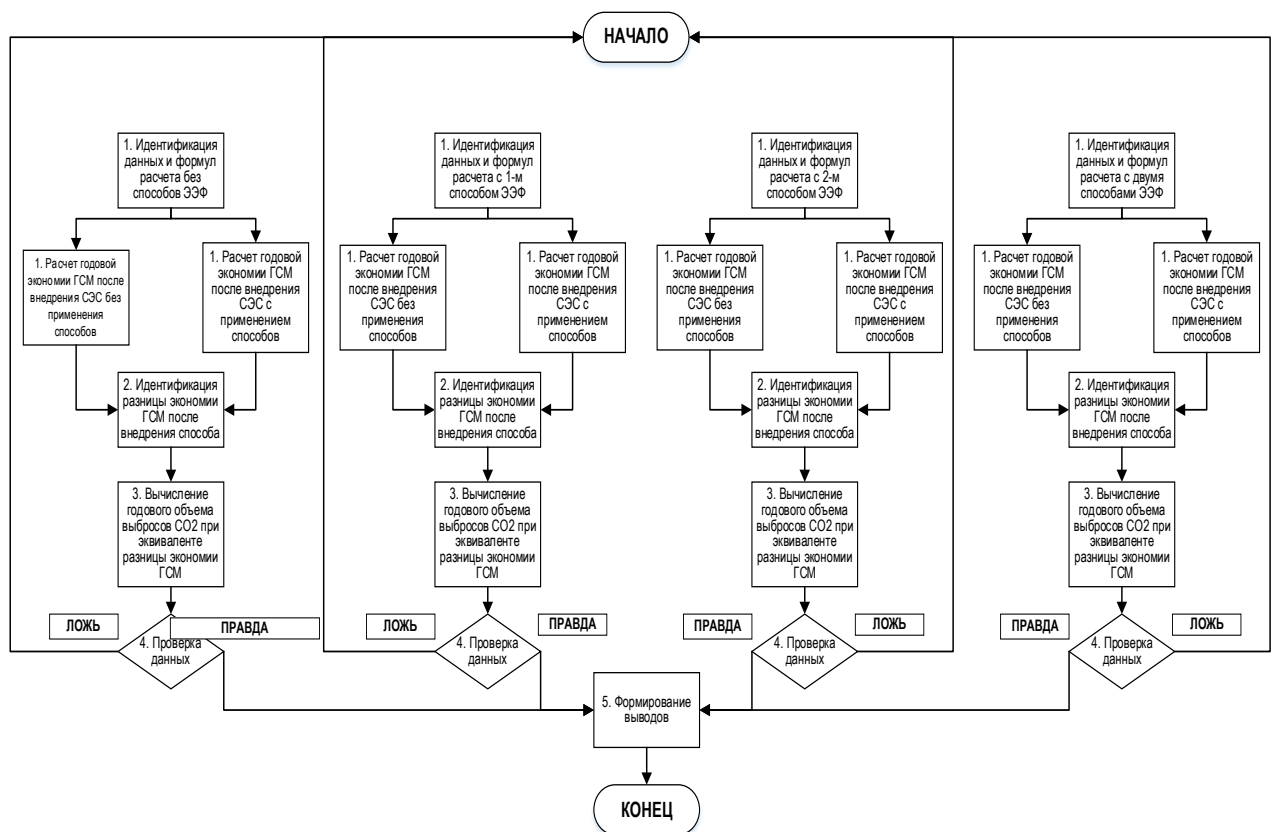


Рисунок 5.2 – Блок-схема алгоритма идентификации эффекта влияния предлагаемых способов на окружающую среду

1. Расчет годового количества уменьшения выбросов CO_2 в атмосферу вследствие сгорания дизельного топлива производится по выражению (5.11):

$$V_{\text{CO}_2} = M_{\text{ДТм.у.т}} \cdot k_{\text{ДТ}}, \quad (5.11)$$

где $M_{\text{ДТм.у.т}}$ – суммарная годовая экономия дизельного топлива, т.у.т; $k_{\text{ДТ}}$ – переводной коэффициент для дизельного топлива, который равен 2,172.

2. Расчет суммарной годовой экономии дизельного топлива в т.у.т производится по выражению (5.12):

$$M_{ДТг.у.м} = M_{ДТ} \cdot \partial_{ДТ}, \quad (5.12)$$

где $M_{ДТ}$ – суммарная годовая экономия дизельного топлива, т.н.т; $\partial_{ДТ}$ – переводной коэффициент при переводе массы дизельного топлива из т.н.т в т.у.т, который равен 1,45.

3. Расчет суммарной годовой экономии дизельного топлива в т.н.т производится по выражению (5.2).

5.4 Результаты расчета показателей технико-экономического обоснования предлагаемых технических решений при модернизации автономной энергосистемы

Ранее по итогам оценки надежности вариантов модернизации автономной энергосистемы идентифицирован наиболее оптимальный вариант – строительство солнечной ЭС с системой накопления энергии и применением разработанных способов повышения ЭЭФ.

Вычисления показателей технико-экономического обоснования строительства солнечной ЭС выполнены с акцентом на идентификацию эффекта применения разработанных способов со следующими выборками: применение способа – 1; применение способа – 2; комплексное применение двух способов. В таблицах 5.1, 5.2 представлены результаты данных вычислений по вышеуказанным показателям (Рисунок 5.3).

Таблица 5.1 – Техничко-экономические и экологические показатели модернизации автономной энергосистемы

№	Наименование показателя	Варианты применения способов повышения ЭЭФ			
		Без способов	Способ I	Способ II	Способы I и II
1.	Капитальные расходы внедрения солнечной ЭС, тыс. руб.	7500,00			

№	Наименование показателя	Варианты применения способов повышения ЭЭФ			
		Без способов	Способ I	Способ II	Способы I и II
2.	Амортизация объекта, тыс. руб./год	375,00	375,00	375,00	375,00
3.	Фонд оплаты труда на новые способы ЭЭФ, тыс. руб./год	0,00	50,00	50,00	100,00
4.	Затраты на новые способы ЭЭФ, тыс. руб./год	0,00	150,00	50,00	200,00
5.	Суммарные операционные затраты, тыс. руб./год	375,00	575,00	475,00	675,00
6.	Удельная себестоимость электроэнергии, руб/кВт·ч	12,36	16,08	13,28	16,78
7.	Удельная годовая экономия на ГСМ, тыс. руб/кВт	44,11	52,01	52,03	58,51
8.	Годовая экономия на ГСМ, тыс. руб.	1323,29	1560,16	1560,85	1755,20
9.	Годовые доходы, тыс. руб.	758,63	788,13	868,68	864,16
10.	Чистый приведенный доход, тыс. руб.	384,90	273,50	76,39	36,94
11.	Срок окупаемости, лет	9,89	9,52	8,63	8,68
12.	Дисконтированный срок окупаемости, лет.	14	13	11	11
13.	Годовое уменьшение выбросов CO ₂ , т.	41,68	49,15	49,17	55,29

Таблица 5.2 – Электроэнергетические показатели модернизации

№	Наименование показателя	Вариант применения способов повышения ЭЭФ			
		Без способов	Способ I	Способ II	Способы I и II
1.	Годовая фактическая выработка ДЭС до модернизации, кВт·ч	92676,00			
2.	Годовая расчетная выработка солнечной ЭС, кВт·ч	32849,83	38735,81	46482,97	49280,56
3.	Годовой период автономной работы солнечной ЭС, мес.	0,00	0,00	0,00	1,00
4.	Годовая расчетная выработка ДЭС после модернизации, кВт·ч	62340,60	56910,56	56894,76	52439,53
5.	Удельная годовая экономия дизельного топлива, т/кВт	0,44	0,52	0,52	0,59
6.	Экономия дизельного топлива, т./год	13,23	15,60	15,61	17,55
7.	Экономия моторного масла, т./год	0,20	0,21	0,22	0,23

Комплексное применение двух способов в функционировании солнечной ЭС ускоряет дисконтированный срок окупаемости на 3 года, снижает годовые выбросы

CO₂ на 13,61 тонн, но увеличивает суммарные операционные затраты на 300тыс.рублей в год.

Неравномерные различия расчетной выработки солнечной ЭС при параллельном функционировании с автономной энергосистемой обосновывается увеличением выработки ФЭП на летний период эксплуатации, который практически не потребляется. Повышенная выработка солнечной ЭС наблюдается на период «Май–Июль» и может служить дополнительным источником питания для непостоянных потребителей на летний период.

Комплексное применение двух способов повышения ЭЭФ в функционировании солнечной ЭС увеличивает годовую экономию дизельного топлива на 4,32 т., а моторного масла - на 0,03 тонны. На рисунке 4.8 представлен график окупаемости солнечной ЭС после модернизации автономной энергосистемы.

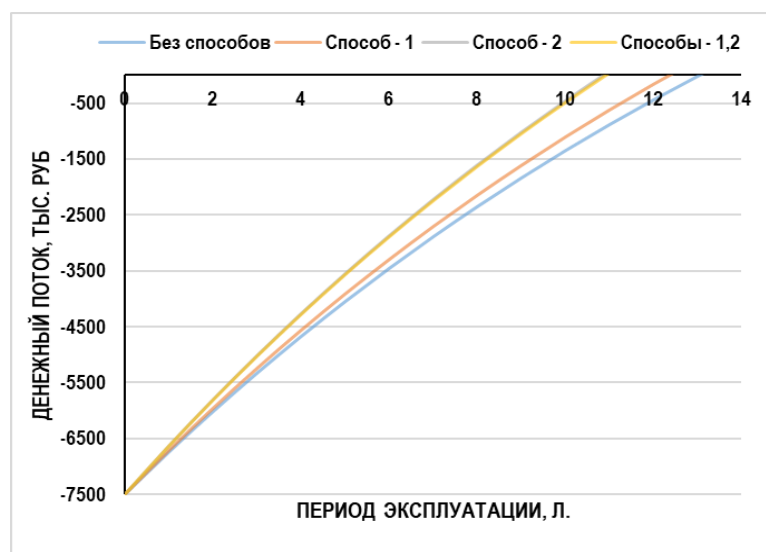


Рисунок 5.3 – График окупаемости рассматриваемой энергосистемы

В результате проведенной оценки модернизации автономной энергосистемы рекомендовано комплексное применение двух способов повышения ЭЭФ со следующими технико-экономическими показателями: дисконтированный срок окупаемости – 11 лет; годовая экономия моторного топлива – 0,23 т; удельная годовая экономия дизельного топлива – до 0,59 т./кВт; уменьшение годовых выбросов CO₂ – до 55,29 т; период автономной работы без включения ДЭС – до 1мес./год.

5.5 Анализ среднесуточных графиков выработки электроэнергии от автономной энергосистемы

После определения необходимости комплексного применения двух способов повышения энергоэффективности на базе автономной энергосистемы в с. Мачах произведен анализ среднесуточных графиков выработки электроэнергии с разделением на четыре сезона эксплуатации (зима, весна, лето и осень.). Посредством применения разработанной математической модели (§3.8) построены необходимые среднесуточные графики выработки электроэнергии от автономной энергосистемы в с. Мачах, представленные на рисунках 5.4, 5.5, 5.6., 5.7. На рисунке 5.8 приведен среднегодовой график выработки электроэнергии от генерирующих элементов автономной энергосистемы в случае комплексного применения разработанных способов в с. Мачах.

Анализ среднесуточных графиков выработки электроэнергии от автономной энергосистемы с солнечными ЭС (Таблица 5.3) при комплексном применении разработанных способов показал, что: в летний период – продолжительность автономного питания потребителей от солнечной ЭС составила 14...24 часов в сутки; в осенний период – до 2 часов в сутки. При этом КИУМ солнечной ЭС увеличен на 7,5...9,5%.

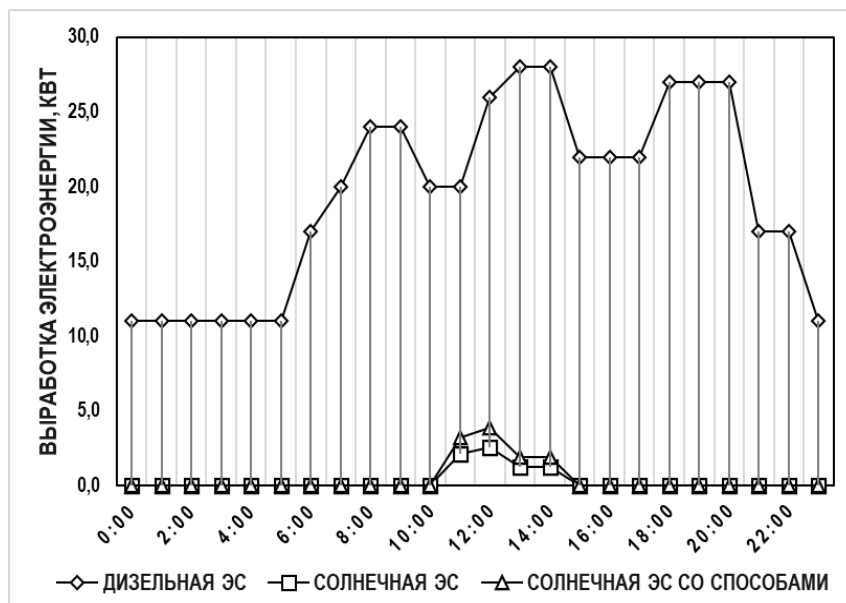


Рисунок 5.4 – Зимний среднесуточный график выработки электроэнергии

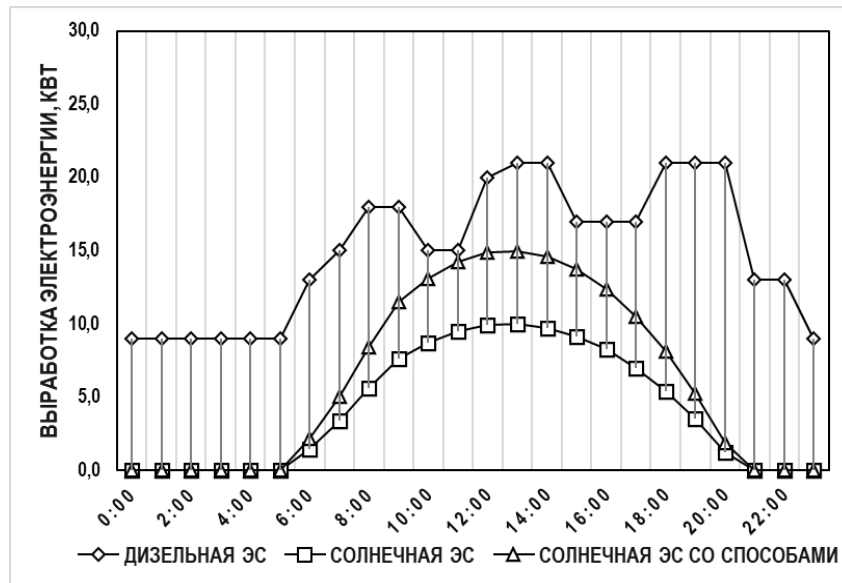


Рисунок 5.5 – Весенний среднесуточный график выработки электроэнергии

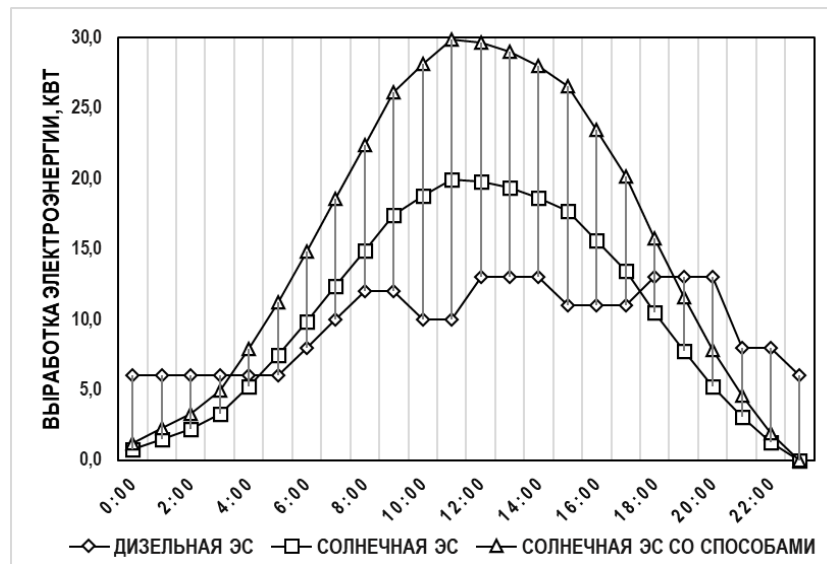


Рисунок 5.6 – Летний среднесуточный график выработки электроэнергии

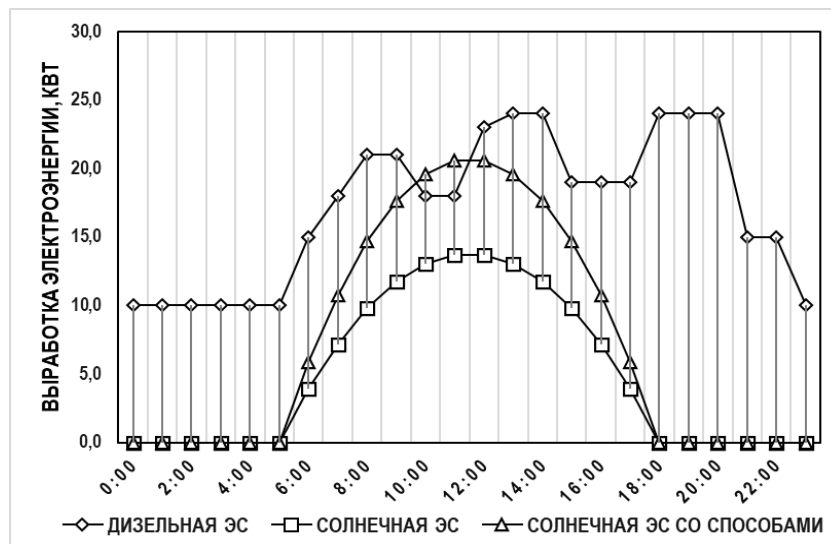


Рисунок 5.7 – Осенний среднесуточный график выработки электроэнергии

Таблица 5.3 – Результаты анализа среднесуточных графиков

Наименование параметра	Сезон эксплуатации	Выработка электроэнергии от солнечной ЭС, кВт·ч	
		Без способов	Способы I и II
Выработка электроэнергии от солнечной ЭС, кВт·ч	ЗИМА	251,8	383,5
	ВЕСНА	11697,7	17546,6
	ЛЕТО	18687,9	28031,9
	ОСЕНЬ	2212,4	3318,5
Среднесуточный период автономной работы, час/сутки	ЗИМА	0,0	0,0
	ВЕСНА	0,0	0,0
	ЛЕТО	13,00	14,0...24,0
	ОСЕНЬ	0,0	2,0
КИУМ, %		13...15	19,5...22,5

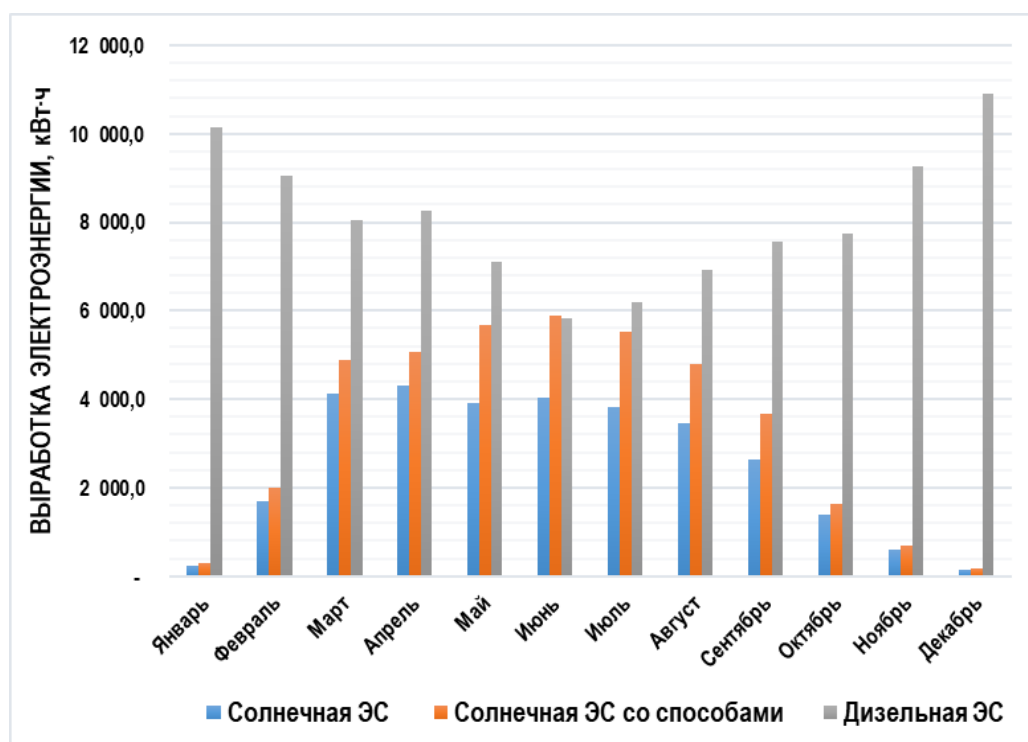


Рисунок 5.8 – Среднегодовой график выработки электроэнергии от генерирующих элементов автономной энергосистемы в с. Мачах

В связи с этим разработанные способы повышения энергоэффективности позволяют реализовать следующие возможности: автономное электроснабжение населенного пункта от солнечной ЭС без применения ДЭС в течение июня; увеличение КИУМ солнечной ЭС с 13...15% на 19,5...22,5%.

Выводы по пятой главе

1. Выработан алгоритм оценки технико-экономических и экологических показателей эффекта применения разработанных способов повышения энергоэффективности на базе автономной энергосистемы с солнечной электростанцией.

2. Выполнена технико-экономическая и экологическая оценка эффекта применения разработанных способов в автономной энергосистеме с солнечной электростанцией при четырех вариантах: Вариант 1 – без применения разработанных способов; Вариант 2 – с применением способа 1; Вариант 3 – с применением способа 2; Вариант 4 – с применением двух разработанных способов в комплексе.

3. Технико-экономическая и экологическая оценки функционирования автономной энергосистемы с солнечной электростанцией на примере с. Мачах (северная Якутия) показали, что при комплексном применении разработанных способов, достигается следующее: годовая экономия моторного масла – 0,23 т; годовая экономия дизельного топлива – до 17,55 т; уменьшение годовых выбросов CO₂ на 55,29 т.; период автономной работы солнечной электростанции без выработки дизельной электростанции – до 1 мес./год; дисконтированный срок окупаемости применения способов в оцениваемый объект – 11 лет.

4. Анализ среднесуточных графиков выработки электроэнергии от автономных энергосистем с солнечными электростанциями при комплексном применении представленных в работе способов показал, что в летний период – продолжительность автономного питания от солнечной электростанции составила 14...24 часов в сутки. При этом коэффициент использования установленной мощности солнечной электростанции увеличивается на 7,5...9,5%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В автономных энергосистемах Северо-Востока России совершенствуется применение солнечных электростанций. Бесперебойное функционирование и стабильность режимов работы солнечных электростанций зависят от характера влияния внешних факторов, таких как: солнечная инсоляция; облачность; задымление окружающей среды, вызванное лесными пожарами; температура окружающей среды; поверхностное загрязнение фотоэлектрических панелей (пыль, снег). Влияние данных факторов имеет сезонный характер. Отсутствие учета внешних факторов приводит к отклонениям расчетных и фактических показателей функционирования солнечной электростанции на 10...22%.

2. Проведенные натурные исследования по идентификации характера и показателей влияния внешних факторов Севера на режим работы солнечных электростанций, функционирующих в составе автономных энергосистем, установили следующее: поверхностное загрязнение фотоэлектрических панелей, вызванное мелкодисперсными фракциями пыли, уменьшает выработку электроэнергии на 44...46%; поверхностное загрязнение фотоэлектрических панелей, вызванное снеговым покровом, уменьшает выработку электроэнергии на 12,4...79%; задымление окружающей среды, вызванное сезонными лесными пожарами, уменьшает выработку электроэнергии на 33,88...74,42%; наличие облачности уменьшает выработку электроэнергии на 8,03...95,18%; при температуре окружающей среды в диапазоне $-60...+20$ °C показатели выработки электроэнергии ($-3,28...-0,16\%$); температура окружающей среды в диапазоне $+30...+40$ °C уменьшает выработку электроэнергии на 16,81%.

3. Методика расчета рабочих параметров солнечных электростанций, учитывающая дополняющие коэффициенты внешних факторов, позволяет повысить точность результатов расчета электроэнергетических и технико-экономических параметров функционирования электростанций в сравнении с фактическими значениями.

4. Разработана математическая модель функционирования солнечных электростанций на базе предложенной методики, учитывающая внешние факторы и позволяющая выполнить оценку ее энергопотенциала. Доказано, что данная модель увеличивает достоверность результатов расчета в среднем на 4,69% путем сопоставления расчетных и фактических данных функционирования 6-ти действующих солнечных электростанций на территории Северо-Востока России.

5. Разработан способ дугообразного размещения фотоэлектрических панелей электростанций, учитывающий траекторию движения Солнца, и позволяющий увеличить выработку электроэнергии на 33,25%. Сущность данного способа заключается в размещении двухсторонних фотоэлектрических панелей по дугообразной форме на специальном светоотражающем покрытии. Данный способ позволяет увеличить объем экономии топлива на 34%, уменьшить объемы выбросов CO₂ на 33,8% в течение летнего периода. При этом размер площади размещения панелей увеличивается в сравнении с линейным способом размещения.

6. Разработанный способ защиты фотоэлектрических панелей солнечных электростанций от негативного влияния поверхностного загрязнения, вызванного мелкодисперсными фракциями пыли в летне-осенний и снеговым покровом в зимне-весенний периоды, предохраняет от образования загрязнения на поверхности панелей в течение 14 суток вследствие чего уменьшается периодичность их очистки. Сущность данного способа заключается в нанесении жидкого воскового покрытия на поверхность панели. Исследования показали, что применение разработанного способа снижает интенсивность загрязнения панелей. При отсутствии применения данного способа защиты выработка электрической энергии снижается на 46%, а при применении – на 9,90%. То есть эффект от применения данного способа уменьшает уровень снижения выработки электроэнергии по причине негативного влияния поверхностного загрязнения – в среднем на 37%.

7. Проведенный анализ показателей надежности автономной энергосистемы с солнечной электростанцией и системой накопления энергии на

примере с. Мачах (северная Якутия) показал, что при комплексном применении (внедрении) разработанных и предложенных в работе способов достигаются следующие результаты: уменьшение недоотпуска электроэнергии на 2,88%; увеличение коэффициента готовности объекта на 1,42%; увеличение вероятности безотказной работы на 20,89%.

8. Техничко-экономическая и экологическая оценки функционирования автономной энергосистемы с солнечной электростанцией на примере с. Мачах (северная Якутия) при комплексном применении (внедрении) разработанных и предложенных в работе способов показал следующее: годовая экономия моторного масла – 0,23 т.; годовая экономия дизельного топлива – до 17,55 т.; уменьшение годовых выбросов CO₂ на 55,29 т.; период автономной работы солнечной электростанции без выработки дизельной электростанции – до 1 мес./год; дисконтированный срок окупаемости применения способов в оцениваемый объект – 11 лет.

9. Анализ среднесуточных графиков выработки электроэнергии от автономных энергосистем с солнечными электростанциями при комплексном применении представленных в работе способов показал, что в летний период – продолжительность автономного питания от солнечной электростанции составила 14...24 часов в сутки. При этом коэффициент использования установленной мощности солнечной электростанции увеличивается на 7,5...9,5%.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АКБ	–	Аккумуляторная батарея
АКС	–	Автономная климатическая станция
АЧТ	–	Абсолютно черное тело
ВАХ	–	Вольтамперная характеристика
ВИЭ	–	Возобновляемые источники энергии
ГРЭС	–	Государственная районная электростанция
ГСМ	–	Горюче-смазочные материалы
ГЭС	–	Гидроэлектростанция
ДГУ	–	Дизель-генераторная установка
ДТУ	–	Двухосевая трекерная установка
ДЭС	–	Дизельная электростанция
ЕЭС России	–	Единая энергетическая система России
КИУМ	–	Коэффициент использования установленной мощности
КПД	–	Коэффициент полезного действия
ЛЭП	–	Линия электропередачи
ОРЭМ	–	Оптовый рынок электроэнергии и мощности
ПДК	–	Предельно-допустимая концентрация
ПК	–	Программный комплекс
РЗиА	–	Релейная защита и автоматика
РС(Я)	–	Республика Саха (Якутия)
СНЭ	–	Система накопления энергии
СО РАН	–	Сибирское отделение Российской Академии наук
СО ₂	–	Углекислый газ
Солнечная ЭС	–	Солнечная электростанция

ТИТЭС	– технологически изолированные электроэнергетические системы
т.н.т	– тонн натурального топлива
т.у.т	– тонн условного топлива
ТЭЦ	– Теплоэлектроцентраль
УГМС	– Управление гидрометеорологической службы
ФЭП	– Фотоэлектрическая панель
ШИМ	– Широтно-импульсная модуляция
ЭС	– Электростанция
ЭЭФ	– Энергоэффективность

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Амиров, Д.И.** Автоматизированная система очистки солнечных панелей / Д.И. Амиров // Тинчуринские чтения – 2020 «Энергетика и цифровая трансформация»: Материалы Международной молодежной научной конференции. В 3–х томах, Казань, 28–29 апреля 2020 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2020. – С. 523–526. – EDN OOKEUR.
2. **Амиров, Д.И.** Исследование электрических двигателей для автоматизированных систем очистки солнечных панелей / Д.И. Амиров, Ю.Н. Зацаринная, А.Г. Логачева, Е.А. Федотов // Труды Академэнерго. – 2020. – №4(61). – С. 74–85. – EDN IBNQZS.
3. **Андреев, С.Г.** Экспериментальные методы физики взрыва и удара / С.Г. Андреев, М.М. Бойко, В.В. Селиванов. – Москва: ООО Издательская фирма «Физико–математическая литература», 2013. – С. 752. – ISBN 978–5–9221–1496–7. – EDN UGLCJL.
4. **Анисимов, О.А.** Континентальная МНОГОЛЕТНЯЯ мерзлота / Анисимов О.А., Анохин Ю.А., Лавров С.А., Малкова Г.В., Павлов А.В., Романовский В.Е., Стрелецкий Д.А., Холодов А.Л. и Шикломанов Н.И. // Методы изучения последствий изменений климата для природных систем. Ред. С.М. Семенов. М. изд ВНИИГМИ, 2012. С. 268–328.
5. **Анисимов, С.С.** Анализ лесных пожаров в Якутии / С.С. Анисимов, Р.Н. Дедюкин, А.И. Борисов [и др.] // Молодой ученый. – 2017. – №48(182). – С. 8–11.
6. **Афанасьев, Д.Е.** Энергосберегающие и ресурсоактивирующие электромагнитные технологии в сельском хозяйстве Якутии: монография / Д.Е. Афанасьев и др. – Якутск: Издательский дом СВФУ, 2021. – С. 536.
7. **Бакиров, С.М.** Обоснование внепланового технического обслуживания солнечных батарей, используемых в качестве источника питания дождевальных машин / С.М. Бакиров, С.С. Елисеев // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2020. – Т. 67. – №1(38). – С. 16–21. – DOI 10.22314/2658–4859–2020–67–1–16–21. – EDN WCKKYW.

8. **Бакиров, С.М.** Снижение мощности электропривода секции дождевальнoй машины за счет изменения диаметра водораспределительного трубопровода / Г. П. Ерошенко, Д. А. Соловьев, С. М. Бакиров // Известия Санкт–Петербургского государственного аграрного университета. – 2019. – № 55. – С. 178–184. – DOI 10.24411/2078–1318–2019–. – EDN AXGJJU.

9. **Басан, Д.** Исследование влияния запыления на эффективность работы солнечных модулей с учетом природных особенностей Монголии / Д. Басан, Ю.Г. Коломиец, М.Ж. Сулейманов // Возобновляемая энергетика XXI век: Энергетическая и экономическая эффективность: Материалы IV Международного конгресса REENCON–XXI, Сколково, 05–06 июня 2018 года / Под редакцией Д.О. Дуникова, О.С. Попеля. – Сколково: Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, 2018. – С. 21–25. – EDN VMSTRB.

10. **Бекиров, Э.А.** Анализ систем водяного охлаждения фотоэлектрических панелей / Э.А. Бекиров, М.М. Асанов // Строительство и техногенная безопасность. – 2017. – № 6(58). – С. 55–58. – EDN ZGVGDN.

11. **Бессель, В.В.** Изучение солнечных фотоэлектрических элементов: Учебно–методическое пособие / Кучеров В.Г., Мингалеева Р.Д. – М.: Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2016. – С. 90.

12. **Бочков, И.С.** Влияние окружающей среды на работу солнечных панелей / И.С. Бочков, Д.И. Амиров // Электроэнергетика глазами молодежи – 2018: Материалы IX Международной молодежной научно–технической конференции. В 3–х томах, Казань, 01–05 октября 2018 года / Ответственный редактор Э.В. Шамсутдинов. Том 3. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2018. – С. 36–37. – EDN ZAXELZ.

13. **Бубенчиков, А.А.** Солнечная энергия как источник электрической энергии / А.А. Бубенчиков, Е.Е. Нурахмет, В.О. Молодых, А.И. Руденок // Международный научно–исследовательский журнал. – 2016. – №5–3(47). – С. 59–62. – DOI 10.18454/IRJ.2016.47.288. – EDN VXMFMV.

14. **Васильев, П.Ф.** Исследование влияния резко–континентального климата Якутии на функционирование солнечных панелей / П.Ф. Васильев, Н.П.

Местников // Международный технико–экономический журнал. – 2021. – № 1. – С. 57–64. – DOI 10.34286/1995–4646–2021–76–1–57–64.

15. **Васильев, П.Ф.** Исследование функционирования фотоэлектрической солнечной установки в условиях лесных пожаров на территории Северной части Дальнего Востока России / П.Ф. Васильев, Н.П. Местников // Международный технико–экономический журнал. – 2021. – № 4. – С. 25–34. – DOI 10.34286/1995–4646–2021–79–4–25–34.

16. **Васильев, П.Ф.** Разработка математической модели объектов солнечной энергетики малой мощности в условиях холодного климата Севера и Арктики / Н.П. Местников, П.Ф. Васильев // Актуальные вопросы теплофизики, энергетики и гидрогазодинамики в условиях Арктики: Тезисы Всероссийской научно–практической конференции с международным участием, посвященной 85–летию со дня рождения заслуженного деятеля науки РФ и ЯАССР, д. т. н., профессора Э. А. Бондарева, Якутск, 12–17 июля 2021 года. – Киров: Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании, 2021. – С. 160–162. – EDN GXLXFG.

17. **Васильченко, Л.Н.** Применение теории планирования эксперимента в теплофизических исследованиях: специальность 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Васильченко Лариса Николаевна. – Одесса, 1984. – С. 134. – EDN NPMСIT.

18. ВОЗ. Воздействие взвешенных частиц на здоровье. [Электронный ресурс]: режим доступа: <https://clck.ru/WHorD>.

19. **Воробьев, П.** Цифровизация исследований в области солнечных следящих устройств и очищения солнечных панелей / П. Воробьев, Ж.А. Круз–Ортиз, А.А. Моран–Тэйез // Комплексное взаимодействие лингвистических и выпускающих кафедр в техническом вузе: Международная научно–практическая конференция, посвященная 125–летию РУТ (МИИТ), Москва, 27 мая 2021 года. – Москва: Российский университет транспорта, 2021. – С. 112–118. – EDN XSCKGL.

20. **Воропай, Н.И.** К анализу эффективности Единой электроэнергетической системы России / Н.И. Воропай, В.В. Труфанов, В.В. Селифанов, Г.И. Шевелева // *Электричество*. – 2000. – № 5. – С. 2–10. – EDN VAUWHT.

21. **Воропай, Н.И.** Методы управления физико–техническими системами энергетики в новых условиях / Н.И. Воропай, Н.Н. Новицкий, Е.В. Сеннова [и др.]; Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН; Ответственные редакторы: доктор технических наук Н.И.Воропай, член–корреспондент РАН А.П.Меренков. – Новосибирск: ГУП Академический научно–издательский производственно–полиграфический и книгораспространительский центр РАН «Издательство «Наука» Обособленное подразделение «Сибирская издательская фирма «Наука», 1995. – С. 335. – ISBN 5–02–031154–5. – EDN RVKYBV.

22. **Воропай, Н.И.** Обоснование развития электроэнергетических систем: методология, модели, методы, их использование / Н.И. Воропай, С.В. Подковальников, В.В. Труфанов [и др.]. – Новосибирск: Федеральное государственное унитарное предприятие "Академический научно–издательский, производственно–полиграфический и книгораспространительский центр "Наука", 2015. – С. 448. – ISBN 978–5–02–019212–6. – EDN ULMZZB.

23. Выбросы CO₂ от сжигания топлива. [Электронный ресурс]: режим доступа: <https://energystats.enerdata.net/co2/emissions-co2-data-from-fuel-combustion.html>.

24. **Герра, Д.Д.** Математическое моделирование солнечной электростанции в климатических условиях Республики Куба / Д.Д. Герра, Э.В. Яковлева // *Вопросы электротехнологии*. – 2020. – № 1(26). – С. 52–60. – EDN IQFAU.

25. **Герра Д.Д.** Электротехнический комплекс слежения за солнцем для обеспечения эффективной работы фотоэлектрических батарей / Д.Д. Герра, Э.В. Яковлева, И.Н. Войтюк, А.В. Коптева – Текст: непосредственный // *Известия ТулГУ. Технические науки*. – 2019. – № 10. – С. 556– 562.

26. **Герра Д.Д.** Математическое моделирование электротехнического комплекса с фотоэлектрическими модулями в климатических условиях республики Куба / Д. Д. Герра, Э. В. Яковлева, Я. Э. Шклярский // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 5. – С. 422-431. – EDN PHMLNN.

27. **ГОСТ 27.310–95.** Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. [Электронный ресурс]: режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200001363>.

28. **ГОСТ Р 27.102–2021.** Надежность в технике. Надежность объекта. [Электронный ресурс]: режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200181141>.

29. **Гржибовский, А.М.** Сравнение количественных данных двух независимых выборок с использованием программного обеспечения STATISTICA и SPSS: параметрические и непараметрические критерии / А.М. Гржибовский, С.В. Иванов, М.А. Горбатова // Наука и здравоохранение. – 2016. – №2. – С. 5–28. – EDN VWXBVL.

30. **Гришкевич, П.Н.** Опыт использования математической теории планирования при исследовании работы роторного соломоотделителя / П.Н. Гришкевич // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 1975. – № 17. – С. 66–72. – EDN VQWKYV.

31. **Джамай, Е.В.** Оценка стоимости интеллектуальной собственности предприятия наукоемкой отрасли промышленности / Е.В. Джамай, А.И. Поликарпов // Насосы. Турбины. Системы. – 2013. – № 2(7). – С. 88–97. – EDN RCEHNL.

32. Доля ветровой и солнечной энергии в производстве электроэнергии. [Электронный ресурс]: режим доступа: <https://energystats.enerdata.net/renewables/wind-solar-share-electricity-production.html>.

33. Единая энергетическая система России. [Электронный ресурс]: режим доступа: <https://www.so-ups.ru/functioning/ees/ups2022/>.

34. **Жизнин С.З., Дакалов М.В.** Возобновляемые источники энергии в мире и в России. Учебное пособие. Изд-во: МГИМО–Университет. ISBN 978–5–9228–2010–3, 2019 г. – С. 209.
35. **Жиркова, И.С.** Механизмы выравнивания тарифов на электроэнергию в Республике Саха (Якутия) / И.С. Жиркова, И.Д. Элякова. – Якутск: Северо–Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, 2019. – С. 96. – ISBN 978–5–7513–2815–3. – EDN BAVPJL.
36. Западные электрические сети Якутии. [Электронный ресурс]: режим доступа: http://museum.rao-esv.ru/power_facilities/197.
37. **Зацаринная, Ю.Н.** Исследование эффективности работы солнечной панели при воздействии на нее загрязнителей / Ю.Н. Зацаринная, Д.И. Амиров, Л.В. Земскова, Р.Р. Рахматуллин // Труды Академэнерго. – 2019. – №1(54). – С. 81–92. – EDN HQILFA.
38. **Зацаринная, Ю.Н.** Исследование эффективности работы солнечной панели при воздействии на нее загрязнителей. / Амиров, Д.И., Земскова, Л.В., Рахматуллин Р.Р. Журнал «Труды Академэнерго». Изд-во: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук». Номер 1. 2019 год. – С. 81–92.
39. Патент № 2794626 С1 Российская Федерация, МПК H02S 40/10. Способ повышения электроэнергетической эффективности солнечной электростанции микро– и малой мощности: № 2022126618: заявл. 13.10.2022: опубл. 24.04.2023 / **Н.П. Местников, П.Ф. Васильев**; заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр "Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук". – EDN IZDJPX.
40. Заявка на получение патента на изобретение от 19.09.2022 №2022124583. **Местников Н.П., Васильев П.Ф.** Способ защиты фотоэлектрической солнечной панели от поверхностного загрязнения.
41. **Иванова, Е.В.** Критерий влияния несимметричной нагрузки в низковольтной сети на искажение напряжения в сети среднего напряжения / А.И.

Антонов, Ю.М. Денчик, М.Н. Иванов [и др.] // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2018. – № 2. – С. 249–253. – EDN VTHWIW.

42. **Иванова, Е.В.** Проблемы установки воздушных линий электропередачи в районах с суровым климатом / А.О. Бурилов, Р.В. Семенихин, Е.В. Иванова // Студенческий вестник. – 2019. – № 23–6(73). – С. 46–48. – EDN PDLZTB.

43. **Иванова, Е.В.** Симметрирующий аспект двигательной нагрузки в сетях 6–10 кВ удалённых ресурсодобывающих регионов / Е.В. Иванова, Н.А. Рыковский, Н.А. Ковалева // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2014. – № 3. – С. 163–166. – EDN RIZDCF.

44. **Иванова, И.Ю.** Повышение эффективности энергоснабжения в децентрализованной зоне с использованием возобновляемых природных энергетических ресурсов на примере Иркутской области / И.Ю. Иванова, Т.Ф. Тугузова, Н.А. Халгаева // Системы. Методы. Технологии. – 2016. – №1(29). – С. 83–88. – DOI 10.18324/2077–5415–2016–1–83–88. – EDN VQEUUN.

45. **Ильин, М.М.** Оценка возможностей использования солнечной энергии для теплоснабжения в сельской местности Якутской АССР / М.М. Ильин, И.И. Тимофеев // Энергосбережение и нетрадиционные источники энергии в сельской местности. – Иркутск: СЭИ СО АН СССР, 1989. – С. 126–155.

46. **Ильин, М.М.** Системы солнечного теплоснабжения и возможности их применения в условиях центральной Якутии / М.М. Ильин // Проблемы теплоснабжения в условиях Крайнего Севера. – Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1984. – С. 98–104.

47. Интенсивность выбросов CO₂ при постоянном паритете покупательной способности. [Электронный ресурс]: режим доступа: <https://energystats.enerdata.net/co2/world-CO2-intensity.html>.

48. Информация о предприятии АО «Сахаэнерго». [Электронный ресурс]: режим доступа: <https://www.sakhaenergo.ru/about>.

49. Калькулятор перевода натурального топлива в условное. [Электронный ресурс]: режим доступа: <https://www.kotel-modul.ru/useful/table>.

50. **Кане, М.М.** Основы научных исследований в технологии машиностроения / М.М. Кане. – Минск: Высшая школа, 1987. – С. 231 – EDN EХНDКН.

51. **Карлащук, В.И.** Элементы солнечных электростанций / В.И. Карлащук // Инженерный вестник. – 2014. – № 4. – С. 3. – EDN SUCTHD.

52. **Квитко, А.В.** Перспективы и особенности работы солнечных фотоэлектрических станций / А.В. Квитко, Г.С. Отмахов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2017. – №131. – С. 56–68. – DOI 10.21515/1990–4665–131–007. – EDN ZRXVGR.

53. **Киевец, А.В.** Исследование влияния изменения температуры солнечных панелей на выходные характеристики солнечной электростанции в условиях частичной затененности / Ю.Д. Бай, А.А. Суворов [и др.] // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2020. – Т. 24. – №3(152). – С. 627–638. – DOI 10.21285/1814–3520–2020–3–627–638.

54. **Киушкина, В.Р.** Рейтинг районов Республики Саха (Якутия) по электропотреблению / В. Р. Киушкина // Электрика. – 2011. – № 1. – С. 10–13. – EDN NTDJXH.

55. **Киушкина, В.Р.** Факторы оптимизации локальной энергетики Республики (Саха) Якутия / В.Р. Киушкина // Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования, Томск, 17–18 мая 2012 года / Национальный исследовательский Томский политехнический университет; Редакторы: Кудрин Б.И., Лукутин Б.В., Сайгаш А.С. – Томск, 2012. – С. 23–27. – EDN QCWMAR.

56. **Волотковская, Н.С.** Анализ структуры и технического состояния западных электрических сетей Республики Саха (Якутия) / Н.С. Волотковская, А.С. Семенов, О.В. Федоров // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2018. – Т. 20. – №11–12. – С. 46–55. – DOI 10.30724/1998–9903–2018–20–11–12–46–55. – EDN YXRTUT.

57. **Константинов, А.Ф.** Нетрадиционные возобновляемые энергоресурсы Республики Саха (Якутия) / А.Ф. Константинов, Д.Д. Ноговицын // Проблемы энергетики Республики Саха (Якутия): Сборник научных трудов. – Якутск: ГУП «Полиграфист» ЯНЦ СО РАН, 1995. – С. 88–93. – EDN JRYQUT.

58. **Константинов, А.Ф.** Нетрадиционные энергоисточники Якутии (монография) / А. Ф. Константинов // Международный журнал экспериментального образования. – 2012. – №5. – С. 144–145. – EDN RATUMB.

59. **Константинов, А.Ф.** Общая энергетика: Учебное пособие / А.Ф. Константинов; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации; Северо–Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, Физико–технический институт. – Якутск: Северо–Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, 2020. – С. 171. – ISBN 978–5–7513–2905–1. – EDN LHRQJO.

60. **Конькин, Д.А.** Устойчивое развитие энергетических компаний в условиях неопределённости и риска / Д.А. Конькин // Экономика и менеджмент инновационных технологий. – 2014. – № 2(29). – С. 24. – EDN RWZHET.

61. **Котляков, В.М.** Оценка термического сопротивления снежного покрова по температуре грунта / В.М. Котляков, А.В. Сосновский // Лёд и снег. – 2021. – Т. 61. – № 2. – С. 195–205. – DOI 10.31857/S2076673421020081. – EDN XPVXXL.

62. **Кувшинов В.В., Бекиров Э.А.** / Теплофотоэлектрическая установка для комбинированной выработки тепловой и электрической энергии // Строительство и техногенная безопасность // Симферополь: КФУ им. Вернадского, № 15(67) – 2019, С. 141–149.

63. **Кувшинов, В.В.** Использование фотоэлектрических модулей с двухсторонней приёмной поверхностью для установок малой генерации / В.В. Кувшинов, Э.А. Бекиров, Е.В. Гусева // Строительство и техногенная безопасность. – 2021. – № 20(72). – С. 93–100. – DOI 10.37279/2413–1873–2021–20–93–100. – EDN KZONIT.

64. **Кувшинов, В.В.** Установка трекерных систем для повышения генерации электрической энергии солнечными батареями / В.В. Кувшинов, Е.Г. Какушина, Д.А. Каширин // Энергетические установки и технологии. – 2020. – Т. 6. – № 1. – С. 71–76. – EDN RAGNRQ.

65. **Кулдашов, О.Х.** Автоматизированная система мониторинга температуры рабочей поверхности солнечных панелей / О.Х. Кулдашов, У.Ж. Нигматов // Автоматика и программная инженерия. – 2021. – № 3(37). – С. 108–111. – EDN YESDGE.

66. **Куликов, А.Л.** Проблемы и особенности распределённой электроэнергетики / А.Л. Куликов, В.Л. Осокин, Б.В. Папков // Вестник НГИЭИ. – 2018. – №11(90). – С. 123–136. – EDN MACFEW.

67. **Лазанюк, И.В.** Микрогенерации в России: барьеры для развития / И.В. Лазанюк, С.В. Ратнер // Экономический вестник ИПУ РАН. – 2022. – Т. 3. – №1. – С. 89–101. – DOI 10.25728/econbull.2022.1.8–lazanyuk. – EDN LRETGL.

68. **Лемешко, Б.Ю.** Об устойчивости и мощности критериев проверки однородности средних / Б.Ю. Лемешко, С.Б. Лемешко // Измерительная техника. – 2008. – №9. – С. 23–28. – EDN MVJZQL.

69. **Лештаев, О.В.** Анализ показателей качества электроэнергии в системах электроснабжения с сетевыми солнечными электростанциями малой мощности / О.В. Лештаев, Н.А. Стушкина, В.И. Загинайлов // Международный технико-экономический журнал. – 2021. – №5. – С. 48–53. – DOI 10.34286/1995–4646–2021–80–5–48–53. – EDN ZMGGEV.

70. **Лукутин, Б.В.** Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении / Б.В. Лукутин, О.А. Суржикова, Е.Б. Шандарова. – Москва: Энергоатомиздат, 2008. – С. 231. – ISBN 978–5–283–03272–9. – EDN VLVEED.

71. **Лукутин, Б.В.** Критерии вовлечения ВИЭ в повышении энергетической безопасности изолированных труднодоступных территорий Севера и Арктической зоны РФ / Б.В. Лукутин, В.Р. Киушкина, И.С. Иванов // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. –

2021. – Т. 14. – № 5. – С. 507–519. – DOI 10.17516/1999–494X–0329. – EDN UXXHQA.

72. **Макаров, В.Н.** Геохимические особенности техногенных отложений в городе Якутске / В.Н. Макаров, Н.В. Торговкин // Криосфера Земли. – 2018. – Т. 22. – № 3. – С. 27–39. – DOI 10.21782/KZ1560–7496–2018–3(27–39).

73. **Макаров, В.Н.** Эколого–геохимическая оценка снежного покрова Якутска / В. Н. Макаров, Н. В. Торговкин // Лёд и снег. – 2021. – Т. 61. – №3. – С. 420–430. – DOI 10.31857/S2076673421030098.

74. **Макаров, В.Н.** Эколого–геохимические особенности грунтов культурного слоя в Г. Якутске / В.Н. Макаров, Н.В. Торговкин // Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий. Рациональное природопользование. Современное минералообразование: Труды VII Всероссийского симпозиума с международным участием и XIV Всероссийских чтений памяти акад. А.Е. Ферсмана, Чита, 22–25 августа 2018 года / Ответственный редактор Г.А. Юргенсон. – Чита: Забайкальский государственный университет, 2018. – С. 71–77.

75. **Манусов, В.З.** Моделирование законов распределений вероятностей мощности ветровых и солнечных электростанций / В.З. Манусов, Ш.К. Халдаров // Проблемы региональной энергетики. – 2020. – № 3(47). – С. 81–91. – DOI 10.5281/zenodo.4018988. – EDN IPWEVS.

76. **Манусов, В.З.** Моделирование законов распределений мощности ветроэнергетических и солнечных станций / В.З. Манусов, Б.Ю. Лемешко, Ш.К. Халдаров // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 9. – С. 84–95. – DOI 10.18799/24131830/2020/9/2806. – EDN LAERYK.

77. **Манусов, В.З.** Оценка энергетического потенциала солнечной радиации региона с применением солнечного трекера / В.З. Манусов, Д.С. Ахьеев, М.Х. Назаров [и др.] // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. – 2020. – № 1(78). – С. 189–203. – DOI 10.17212/1814–1196–2020–1–189–203. – EDN ZKMARG.

78. **Мартынюк, П.П.** Определение экологически уязвимых районов Севера Якутии в зависимости от воздействия объектов энергетики / П.П. Мартынюк, В.Р. Киушкина // Знание. – 2016. – № 10–2(39). – С. 121–125. – EDN XCMOHN.

79. **Маслеева, О.В.** Комплексная экологическая оценка жизненного цикла малой распределенной и возобновляемой энергетики / О.В. Маслеева, Г.В. Пачурин // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – №8–2. – С. 81–86. – EDN SFWDCJ.

80. **Матвеев, И.Е.** Современный потенциал и перспективы развития западноевропейской энергетики: специальность 08.00.14 «Мировая экономика»: диссертация на соискание ученой степени кандидата экономических наук / Матвеев Игорь Евгеньевич. – Москва, 2013. – С. 212. – EDN SUSONV.

81. **Матыс, В.Г.** Основы научных исследований и инновационной деятельности: Тексты лекций для студентов специальности 1–48 01 04 «Технология электрохимических производств» / В.Г. Матыс, В.В. Жилинский; Белорусский государственный технологический университет. – Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2016. – С. 161. – EDN KKPJUI.

82. **Местников Н.П., Нуруллин Э.Г.** Исследование и моделирование процесса генерации ветровой и солнечной электростанции мощностью 650 Вт. В материалах X Международной научно–технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2019» (МНТК «ИМТОМ–2019»). Ч. 2. – Казань, 2019. – С. 436–439

83. **Местников, Н.П.** Исследование зависимости электроэнергетических процессов солнечной электростанции СЭ-150 / Н. П. Местников, А. М. Н. Альзаккар, Э. Г. Нуруллин // Диспетчеризация и управление в электроэнергетике: Материалы XV Всероссийской открытой молодежной научно-практической конференции, Казань, 21–22 октября 2020 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2020. – С. 55-57. – EDN YVNVFQ.

84. **Местников, Н.П.** Исследование влияния поверхностного загрязнения на функционирование фотоэлектрической панели в условиях Севера / Н.П.

Местников, П.Ф. Васильев, А. М.Н. Альзаккар, А.А. Лобашев // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2022. – Т. 7. – №1(27). – С. 90–97. – DOI 10.25744/genb.2022.24.84.010. – EDN KPTDDE.

85. **Местников, Н.П.** Исследование влияния резко–континентального климата Севера на работу поликристаллической солнечной панели / Н. П. Местников // EurasiaScience: Сборник статей XXXVII международной научно–практической конференции, Москва, 15 мая 2021 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Актуальность.РФ», 2021. – С. 72–74.

86. **Местников, Н.П.** Исследование влияния холодного климата Якутии на функционирование монокристаллической солнечной системы генерации электроэнергии / Н.П. Местников, А.М.Н. Альзаккар // Тинчуринские чтения – 2021 «Энергетика и цифровая трансформация»: Материалы Международной молодежной научной конференции. В 3–х томах, Казань, 28–30 апреля 2021 года / Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова . Том 2. – Казань: Общество с ограниченной ответственностью Полиграфическая компания «Астор и Я», 2021. – С. 256–260. – EDN MYAEDR.

87. **Местников, Н.П.** Исследование и моделирование процесса генерации ветровой и солнечной электростанции мощностью 650 Вт / Н.П. Местников, Э.Г. Нуруллин // Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2019 (МНТК «ИМТОМ – 2019») : Материалы X Международной научно–технической конференции, Казань, 05–06 декабря 2019 года. – Казань: Акционерное общество «Казанский научно–исследовательский институт авиационных технологий», 2019. – С. 436–439. – EDN НХМУАВ.

88. **Местников, Н.П.** Исследование особенностей функционирования фотоэлектрической установки в климатических условиях Севера / Н.П. Местников, А.М.Н. Альзаккар, Э.Г. Нуруллин // Тинчуринские чтения – 2022 «Энергетика и цифровая трансформация»: Сборник статей по материалам конференции. В 3–х томах, Казань, 27–29 апреля 2022 года / Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2022. – С. 30–32. – EDN CGFTRH.

89. **Местников, Н.П.** Исследование функционирования фотоэлектрической установки в условиях крайне низких температур / Н.П. Местников, А.М.Н. Альзаккар, П.Ф. Васильев // Тинчуринские чтения – 2022 «Энергетика и цифровая трансформация»: Сборник статей по материалам конференции. В 3–х томах, Казань, 27–29 апреля 2022 года / Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова. Том 1. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2022. – С. 595–598. – EDN BXOVRF.

90. **Местников, Н.П.** Исследование функционирования фотоэлектрической установки в условиях облачной погоды на территории Севера / Н.П. Местников, П.Ф. Васильев, Г.И. Давыдов [и др.] // iPolytech Journal. – 2022. – Т. 26. – №1. – С. 81–91. – DOI 10.21285/1814–3520–2022–1–81–91. – EDN EJLZDJ.

91. **Местников, Н.П.** Исследование эксплуатации комбинированной системы электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии на Дальнем Востоке России / Н.П. Местников, Н.С. Бурянина, Ю.Ф. Королюк, П.Ф. Васильев // Вопросы электротехнологии. – 2021. – № 2(31). – С. 68–81. – EDN LDGGUP.

92. **Местников, Н.П.** Разработка способа повышения энергоэффективности фотоэлектрической солнечной установки в условиях Севера / Н. П. Местников, А. М. Н. Альзаккар // XVI Всероссийская открытая молодежная научно-практическая конференция «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике», Казань, 20–21 октября 2021 года. – Казань: Общество с ограниченной ответственностью "Издательско-полиграфическая компания "Бриг", 2022. – С. 67-69. – EDN DHWDCM.

93. **Местников, Н.П.** Особенности эксплуатации солнечных электростанций микромощности в условиях Севера / Н.П. Местников; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Северо–Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, Физико–технический институт. – Якутск: Северо–Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, 2022. – С. 155 – ISBN 978–5–7513–3359–1. – EDN ТКТҮРХ.

94. **Местников, Н.П.** Особенности эксплуатации солнечных электростанций микромощности в условиях Севера: Монография / Н.П. Местников; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации; ФГАОУ ВО «Северо–Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова», Физико–технический институт, Кафедра «Электроснабжение». – Якутск: ООО РИЦ «Офсет», 2021. – С. 113. – ISBN 97859114413368. – EDN HKUOSU.

95. **Местников, Н.П.** Оценка функционирования солнечных электростанций в климатических условиях Севера / Н.П. Местников, П.Ф. Васильев, Н.С. Бурянина [и др.] // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2022. – Т. 7. – № 2(28). – С. 101–110. – DOI 10.25744/genb.2022.37.74.011. – EDN OUPGYM.

96. **Местников, Н.П.** Разработка гибридной электростанции для электроснабжения объектов Федерального проекта «Дальневосточный гектар» / Н.П. Местников // Региональная энергетика и энергосбережение. – 2019. – №2. – С. 66. – EDN ZSCTZR.

97. **Местников, Н.П.** Разработка гибридных систем электроснабжения для энергоснабжения удаленных потребителей в условиях Севера и Арктики / Н.П. Местников, П.Ф. Васильев, Ф.Х. Альхадж // Международный технико–экономический журнал. – 2021. – №1. – С. 47–56. – DOI 10.34286/1995–4646–2021–76–1–47–56. – EDN EGIGFP.

98. **Местников, Н.П.** Разработка системы математического моделирования работы объектов солнечной энергетики в условиях Севера / Н.П. Местников, Н.С. Бурянина, П.Ф. Васильев // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2021. – Т. 6. – №2(24). – С. 81–85. – EDN HFYAAE.

99. **Местников, Н.П.** Разработка способа защиты поверхности солнечной панели от снежного покрова в условиях Севера / Н.П. Местников, П.Ф. Васильев, И.И. Куркина // Международный технико–экономический журнал. – 2022. – №1. – С. 46–55. – DOI 10.34286/1995–4646–2022–82–1–46–55. – EDN RXQXOZ.

100. **Местников, Н.П.** Разработка способа защиты фотоэлектрических солнечных установок от поверхностного загрязнения в условиях Севера / Н.П. Местников // Международный технико-экономический журнал. – 2021. – №4. – С. 16–24. – DOI 10.34286/1995-4646-2021-79-4-16-24. – EDN KHHSLR.

101. **Местников, Н.П.** Исследование особенностей функционирования конфигураций размещения фотоэлектрических панелей / Н. П. Местников, А. М. Н. Альзаккар, Д. В. Лыткин [и др.] // EURASTRENCOLD-2022 : Сборник трудов X Евразийского симпозиума по проблемам прочности и ресурса в условиях климатически низких температур, посвященный 100-летию образования ЯАССР и 300-летию Российской Академии наук, Якутск, 12–16 сентября 2022 года / Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН. – Киров: Межрегиональный центр инновационных технологий в образовании, 2022. – С. 315-319. – EDN PEVMLO.

102. Методика расчета выбросов парниковых газов. [Электронный ресурс]: режим доступа: <https://sro150.ru/index.php/metodiki/371-metodika-rascheta-vybrosov-parnikovykh-gazov>.

103. **Миронова, Ю.А.** Трекеры для плавучей солнечной электростанции / Ю.А. Миронова, А.В. Даныш, С.В. Горячев // Энергосбережение и водоподготовка. – 2021. – №4(132). – С. 69–74. – EDN TYBFHJ.

104. **Моисеев, Н.А.** Оценка крупных экономических проектов на основе межотраслевого баланса / Н.А. Моисеев, Б.А. Ахмадеев // Научно-аналитический журнал Наука и практика Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова. – 2019. – Т. 11. – № 2(34). – С. 35–42. – EDN HUVRUQ.

105. **Мороз, В.И.** Спектрофотометрический эксперимент на спускаемых аппаратах «Венера-11» и «Венера-12». 3. Результаты фотометрических измерений / Ю.М. Головин, Б.Е. Мошкин, А.П. Экономов // Космические исследования. – 1981. – Т. 19. – №4. – С. 599–612. – EDN UPCHNH.

106. Научно-технический центр Единой энергетической системы. [Электронный ресурс]: режим доступа: https://www.ntcees.ru/departments/NTO/sections/sb80/journal_80.pdf.

107. **Нехорошее, Д.Д.** Автоматизированная система очистки солнечных панелей / Д.Д. Нехорошее, А.Ю. Попов, Н.Д. Нехорошее // Перспективные тенденции развития научных исследований по приоритетным направлениям модернизации АПК и сельских территорий в современных социально-экономических условиях: Материалы Национальной научно-практической конференции, Волгоград, 15 декабря 2021 года. Том I. – Волгоград: Волгоградский государственный аграрный университет, 2021. – С. 438–443. – EDN GKLCFJ.

108. **Обухов, С.Г.** Выбор параметров и анализ эффективности применения систем слежения за солнцем / С.Г. Обухов, И.А. Плотников // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2018. – Т. 329. – №10. – С. 95–106. – DOI 10.18799/24131830/2018/10/2109. – EDN YNVYDZ.

109. **Обухов, С.Г.** Модель солнечной панели в MATLAB SIMULINK / С.Г. Обухов, И.А. Плотников // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2014. – №21(161). – С. 51–59. – EDN TEFRXV.

110. **Орлов, А.И.** Метод статистических испытаний в прикладной статистике / А.И. Орлов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2019. – Т. 85. – №5. – С. 67–79. – DOI 10.26896/1028-6861-2019-85-5-67-79. – EDN YEXPRV.

111. **Орлов, А.И.** Система моделей и методов проверки однородности двух независимых выборок / А.И. Орлов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2020. – №157. – С. 145–169. – DOI 10.21515/1990-4665-157-012. – EDN DUJNUO.

112. Основные цели и задачи Программы «Оптимизации локальной энергетики Республики Саха (Якутия) на 2008–2013 гг.». [Электронный ресурс]: режим доступа: <https://www.sakhaenergo.ru/about>.

113. Отчет по перечню установленной и располагаемой мощности по объектам автономной генерации АО «Сахаэнерго» по состоянию на октябрь 2022 г.

114. **Палагушкин, Б.В.** Анализ технического состояния высоковольтного электрооборудования на основе двух экспертных подходов / Б.В. Палагушкин, В.З.

Манусов, Г.В. Иванов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2021. – № 1. – С. 42–46. – EDN QWRGUH.

115. **Палагушкин, Б.В.** Выбор оптимальных режимов электропотребления в автономной системе с возобновляемыми источниками энергии / Б. В. Палагушкин, В. З. Манусов // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2021. – № 1. – С. 38–42. – EDN FRWANA.

116. **Палагушкин, Б.В.** Оценка долговечности энергетического оборудования по параметрам среды / Б. В. Палагушкин, Ю. В. Демин, Л. В. Садовская [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. – 2019. – № 1–3(43). – С. 62–67. – EDN TOYCMS.

117. **Панченко, В.А.** Моделирование солнечных теплофотоэлектрических модулей / В.А. Панченко // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2019. – №2(35). – С. 71–77. – EDN RPSNAU.

118. **Панченко, В.А.** Перспективы энергоснабжения объектов Арктической зоны РФ с помощью морозостойких солнечных модулей различной конструкции / В.А. Панченко // Строительство и техногенная безопасность. – 2019. – №17(69). – С. 69–88. – EDN TJGERP.

119. **Панченко, В.А., Сангджиев М.М., Дегтярев К.С.** Влияние пыли и песка на возобновляемые источники энергии в Калмыкии. Журнал «Инновации в сельском хозяйстве». Изд-во: Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ. Номер 1. 2017 год. – С. 176–183.

120. Патент №150122 Российская федерация; МПК Н 01 L 31/00. Фототермопреобразователь солнечной энергии / **Башта А.И., Кувшинов В. В.**; патентообладатели Башта А.И., Кувшинов В. В. – Заявка №2014149416/93; заявл. 17.10.2014; опубл. 27.01.2015, Бюл. №3.

121. Патент №2242824 С1 Российская Федерация, МПК H01L 31/042. Солнечная батарея: №2003125828/28: заявл. 21.08.2003: опубл. 20.12.2004 / **В.А. Битков, А.И. Финтисов, В.С. Кудряшов**; заявитель Открытое акционерное общество «Сатурн». – EDN AXDUXC.

122. Патент №2258640 С1 Российская Федерация, МПК В64G 1/44. Солнечная батарея (варианты): №2004102952/11: заявл. 04.02.2004: опубл. 20.08.2005 / **Л.А. Главацкий, О.Н. Жданов, А. Д. Лукьянов** [и др.]; заявитель Федеральное государственное унитарное предприятие «Государственный космический научно–производственный центр им. М.В. Хруничева». – EDN YNINMM.

123. Патент №2354005 С1 Российская Федерация, МПК Н01L 31/052. Фотоэлектрический модуль: № 2007142909/28: заявл. 16.04.2007: опубл. 27.04.2009 / **Ж.И. Алферов, В.М. Андреев, В.Д. Румянцев** [и др.]; заявитель Закрытое акционерное общество «Техноэксан». – EDN KDEOGR.

124. Патент №2431086 С2 Российская Федерация, МПК F24J 2/42. Солнечная электростанция (варианты): №2009133951/06: заявл. 11.09.2009: опубл. 10.10.2011 / **Д.С. Стребков, М.И. Осьмаков, С.А. Плохих**; заявитель Российская академия сельскохозяйственных наук Государственное научное учреждение Всероссийский научно–исследовательский институт электрификации сельского хозяйства (ГНУ ВИЭСХ РОССЕЛЬХОЗАКАДЕМИИ). – EDN POVWID.

125. Патент №2483991 С1 Российская Федерация, МПК В64G 7/00, В64G 1/44. Стенд раскрытия панелей солнечной батареи: №2011150074/11: заявл. 08.12.2011: опубл. 10.06.2013 / **В.В. Билько, Н.А. Плетнева, В.И. Сороколетов, Ю.П. Шупляк**; заявитель Федеральное Государственное Унитарное Предприятие «Государственный научно–производственный ракетно–космический центр «ЦСКБ–Прогресс» (ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ–Прогресс»). – EDN ZGRWWT.

126. Патент №2645444 С1 Российская Федерация, МПК Н01L 31/024, Н01L 31/042. Устройство и способ автоматизированной очистки солнечной панели: №2017102270: заявл. 24.01.2017: опубл. 21.02.2018 / **Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, В.Е. Вавилов, Р.Д. Каримов**; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет». – EDN VBQSYN.

127. Патент №2764381 С1 Российская Федерация, МПК G01R 31/00, H02J 3/20. Воздушная линия электропередачи: № 2021122636: заявл. 29.07.2021: опубл. 17.01.2022 / **Н. С. Бурянина, Ю. Ф. Королюк, Е. В. Лесных, Н.П. Местников** [и др.]; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо–Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова». – EDN JSTBFL.

128. Патент РФ №2015142798/06, 08.10.2015. Гибридная автономная контейнерная электростанция // Патент России №162099/U1. 27.05.2016. **Батраков Г.В.**

129. **Петров, М.И.** Влияние климатических условий на лесные пожары в Центральной Якутии / М. И. Петров // Устойчивость природных и технических систем в криолитозоне: Материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 60–летию образования Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, 28–30 сентября 2020 года / Ответственные редакторы М.Н. Железняк, В.В. Шепелёв, Р.В. Чжан. – Якутск: Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2020. – С. 298–302.

130. **Петрова, Е.С.** Химический состав снежного покрова на территории Якутска (зима 1999–2020 гг.) / Е. С. Петрова, В. Н. Макаров, Н. В. Торговкин // Геология и минерально–сырьевые ресурсы Северо–Востока России: Материалы XI Всероссийской научно–практической конференции, Якутск, 05–07 апреля 2021 года. – Якутск, 2021. – С. 419–421. – DOI 10.52994/9785751331399_2021_112.

131. Площадь лесных пожаров в Якутии выросла за сутки на 200 тыс. гектаров: [Электронный ресурс]: режим доступа: <https://www.interfax.ru/russia/778182>.

132. **Попель, О.С.** Сравнительный анализ показателей конструкций солнечных коллекторов зарубежного и отечественного производства. Новые технические решения / С.Е. Фрид, В.Н. Щеглов [и др.] // Теплоэнергетика. – 2006. – №3. – С. 11–15. – EDN НТНУQV.

133. **Попова, Я.С.** Применение альтернативных источников энергии для получения электрической энергии / Я.С. Попова // Геонауки: проблемы,

достижения и перспективы развития: Материалы Всероссийской молодежной научно–практической конференции, Якутск, 27–28 апреля 2018 года. – Якутск: Издательский дом СВФУ, 2018. – С. 349–352. – EDN YYVVSJV.

134. Постановление Правительства Российской Федерации от 02.03.2021 №299 «О внесении изменений в некоторые акты Правительства Российской Федерации в части определения особенностей правового регулирования отношений по функционированию объектов микрогенерации». [Электронный ресурс]: режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202103060015>.

135. Прогноз погоды. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.gismeteo.ru/diary/4026>.

136. Прогноз структуры электропроизводства в ЕС до 2030 года. [Электронный ресурс]: режим доступа: <https://energystats.enerdata.net/energy-projections.html>.

137. Прогноз. Статистика. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://russia.pogoda360.ru>.

138. Развитие солнечной энергетики в мире до 2024 года. [Электронный ресурс]: режим доступа: <https://clck.ru/vrQiN>.

139. **Распоряжение Минприроды России от 16.04.2015 г. № 15–р «Об утверждении методических рекомендаций по проведению добровольной инвентаризации объема выбросов парниковых газов в субъектах Российской Федерации».**

140. **Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 №1523–р «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года».** [Электронный ресурс]: режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202006110003>.

141. **Распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 №1523–р «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года».** [Электронный ресурс]: режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_354840/.

142. **Раушенбах, Г.** Справочник по проектированию солнечных батарей / Г. Раушенбах // – М.: Энергоатомиздат, 1983. – С. 397.

143. Реестр квалифицированных генерирующих объектов, функционирующих на основе использования возобновляемых источников энергии. [Электронный ресурс]: режим доступа: https://www.np-sr.ru/sites/default/files/reestr_kvalificirovannyh.xls.

144. Результаты отборов проектов. [Электронный ресурс]: режим доступа: <https://www.atsenergo.ru/vie/proresults>.

145. **Русина, А.Г.** PSCAD как инструментарий создания имитационной модели электроэнергетической системы с возобновляемыми источниками энергии / А.Г. Русина, Д.А. Серохвостов, Д.И. Колесников, А.В. Белоглазов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2021. – Т. 13. – № 1(49). – С. 163–176. – EDN ASFFWC.

146. **Савич, С.П.** Анализ показателей качества электроэнергии солнечной электростанции / С.П. Савич, В.А. Панин // Электротехнические и компьютерные системы. – 2017. – №25(101). – С. 193–198. – EDN YZMVTX.

147. **Сальников, В.Г.** Повышение эксплуатационной надежности и качества тяжело нагруженных деталей износостойкой наплавкой / В. Н. Гадалов, В. Г. Сальников, Ю. В. Скрипкина [и др.] // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. – 2012. – № 8. – С. 23–26. – EDN PUOQOP.

148. **Сальников, В.Г.** Повышение эксплуатационной надежности и качества тяжело нагруженных деталей износостойкой наплавкой / В. Н. Гадалов, В. Г. Сальников, Ю. В. Скрипкина [и др.] // Труды ГОСНИТИ. – 2013. – Т. 112. – № 1. – С. 140–144. – EDN SZTWNH.

149. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2021620092 Российская Федерация. Мониторинг и анализ показателей объемов потребления электроэнергии в Западной экономической зоне Республики Саха (Якутия): №2020622810: заявл. 28.12.2020: опубли. 19.01.2021 / **И.Д. Элякова**; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение

высшего образования «Северо–Восточный федеральный университет имени М.К.Аммосова». – EDN WWFYRI.

150. Свидетельство о государственной регистрации базы данных №2021620143 Российская Федерация. Статистические данные динамики электропотребления в Западной экономической зоне Республики Саха (Якутия): № 2020622840: заявл. 28.12.2020: опубл. 21.01.2021 / **И.Д. Элякова**; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо–Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова». – EDN IGYKMD.

151. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018612744 Российская Федерация. Программа отождествления объектов, полученных беспроводными датчиками и средствами телеметрии: №2018610118: заявл. 09.01.2018: опубл. 26.02.2018 / **В.П. Шкодырев, А.В. Кваснов**; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт–Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»). – EDN HRWQYJ.

152. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020662207 Российская Федерация. Программа имитации функционирования системы дистанционного управления параметрами работы специального контрольно–трекерного устройства: №2020661115: заявл. 28.09.2020: опубл. 09.10.2020 / **А.М. Горбунов, М.Л. Поляков, П.В. Русин**; заявитель Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Военный учебно–научный центр сухопутных войск «Общевойсковая ордена Жукова Академия Вооруженных сил Российской Федерации». – EDN RBNXIY.

153. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020667205 Российская Федерация. «Программа расчета электроэнергетических параметров гибридной электростанции исполнения «Ветер + Солнце» в условиях Арктики»: №2020666287: заявл. 12.12.2020: опубл. 21.12.2020 / **Н.П. Местников, П.Ф. Васильев, Н.С. Бурянина, Ю.Ф. Королюк**; заявитель Федеральное

государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо–Восточный федеральный университет имени М.К.Аммосова». – EDN JRJXAH.

154. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020667411 Российская Федерация. Программа расчета электроэнергетических параметров солнечной электростанции на территории Якутии: №2020666310: заявл. 12.12.2020: опубл. 23.12.2020 / **Н.П. Местников, П.Ф. Васильев, Н.С. Бурянина, Ю.Ф. Королюк**; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо–Восточный федеральный университет имени М.К.Аммосова». – EDN KZOYDT.

155. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021615502 Российская Федерация. Программа расчета электроэнергетических параметров солнечной электростанции для питания фермерского хозяйства на территории Севера и Арктики: №2021614435: заявл. 02.04.2021: опубл. 08.04.2021 / **Н.П. Местников, П.Ф. Васильев**; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо–Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова». – EDN PLZVKO.

156. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2021660383 Российская Федерация. Программа расчета установленной мощности солнечной электростанции для питания нефтеперерабатывающего завода в условиях Арктики: №2021619651: заявл. 22.06.2021: опубл. 25.06.2021 / **Н.П. Местников, П.Ф. Васильев**; заявитель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо–Восточный федеральный университет имени М.К.Аммосова». – EDN RTDAQJ.

157. **Семенов, Б.А.** Инженерный эксперимент в промышленной теплотехнике, теплоэнергетике и теплотехнологиях / Б.А. Семенов. – 2–е, Дополненное. – Санкт–Петербург: Издательство Лань, 2013. – С. 384. – ISBN 978–5–8114–1392–8. – EDN UGRMNB.

158. **Симакин, В.В. Смирнов А.В., Тихонов А.В., Тюхов И.И.** Современная система автономного электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии // Энергетик. – 2013. – №3. – С. 21–25.

159. **Симакин, В.В.** Современная система автономного электроснабжения с использованием возобновляемых источников энергии / Смирнов А.В., Тихонов, А.В., Тюхов, И.И. // Энергетик. – 2013. – №3. – С. 21–25.

160. **Скачков, Ю.Б.** Современные изменения климата Центральной Якутии / Ю. Б. Скачков // Климат и мерзлота: Комплексные исследования в Якутии. – Якутск: Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2000. – С. 55–63.

161. **Слащев, К.Д.** Разработка программно–аппаратного комплекса по очистке поверхности солнечных панелей / К.Д. Слащев // EurasiaScience: Сборник статей XXXVI международной научно–практической конференции, Москва, 31 марта 2021 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью «Актуальность.РФ», 2021. – С. 49–50. – EDN NFCULL.

162. **Снегирев, Д.А.** Возможности алгоритмической реализации краткосрочного прогнозирования выработки солнечных электростанций / Д.А. Снегирев, С.А. Ерошенко, Р.Т. Валиев, А.И. Хальясмаа // Международная научная конференция по проблемам управления в технических системах. – 2017. – Т. 1. – С. 236–239. – EDN ZTSPKH.

163. Солнечная станция ECO 3 с углом. [Электронный ресурс]: режим доступа: <https://yashel.shop/gotovye-resheniya/solnechnaja-stantsija-eco-3-s-uglom>.

164. **Сускин, В.В.** Математическая модель конструкции фотоэлектрической панели с охлаждением / В. В. Сускин, В. Т. Фам // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2017. – № 61. – С. 119–123. – DOI 10.21667/1995–4565–2017–61–3–119–123. – EDN ZHYUTF.

165. **Тарнижевский, Б.В.** Перспективы использования возобновляемых источников энергии в России // Горный журнал, специальный выпуск, 2004, С. 22–25.

166. **Теодорович, Н.Н.** Альтернативная энергетика: перспективы развития / Н.Н. Теодорович, Г.Н. Исаева // Интернет–журнал Науковедение. – 2016. – Т. 8. – № 6(37). – С. 47. – EDN XXYGBR.

167. **Торговкин, Н.В.** Влияние современных климатических изменений на геохимические особенности мерзлотных почв Г. Якутска / Н.В. Торговкин, В.Н. Макаров // Устойчивость природных и технических систем в криолитозоне: Материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 60–летию образования Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, 28–30 сентября 2020 года / Ответственные редакторы М.Н. Железняк, В.В. Шепелёв, Р.В. Чжан. – Якутск: Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2020. – С. 182–184.

168. Требования к ветряным и солнечным электроэнергетическим установкам, работающим в составе энергосистемы. АО «НТЦ ЕЭС». [Электронный ресурс]: режим доступа: http://nts-ees.ru/sites/default/files/2018.08.02_vie.pdf.

169. Требования к системам регулирования, управления и защиты ВИЭ при их работе в составе ЕЭС России. [Электронный ресурс]: режим доступа: http://nts-ees.ru/sites/default/files/2018.08.02_vie.pdf.

170. **Тремясов, В.А.** Многокритериальный подход к выбору площадок для размещения солнечно–дизельных систем генерации. Григорьева О.А., Кенден К.В. *iPolytech Journal*. 2021;25(5):601–610. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-5-601-610>.

171. **Тюньков, Д.А.** Методы краткосрочного прогнозирования выработки электрической энергии солнечными электростанциями и их классификация / Д.А. Тюньков, А.А. Сапилова, А.С. Грицай [и др.] // Электротехнические системы и комплексы. – 2020. – № 3(48). – С. 4–10. – DOI 10.18503/2311-8318-2020-3(48)-4-10. – EDN NBEEZZ.

172. **Уббиниязов, Ж.К.** Моделирование систем солнечных батарей панельного типа с трекерной системой и без на базе программного обеспечения «System adviser model», а также сравнение их эффективности / Ж.К. Уббиниязов, Н

А. Максудова // Молодой ученый. – 2018. – № 19(205). – С. 166–170. – EDN ХОМТЛН.

173. **Угапьева, А.П.** Лесные пожары в Якутии: масштабы и предпринимаемые меры / А.П. Угапьева // Актуальная Якутия: Информационно-аналитический бюллетень / Министерство культуры и духовного развития Республики Саха (Якутия), Национальная библиотека Республики Саха (Якутия). – Якутск: НИЦ НБ РС(Я), 2019. – С. 66–93.

174. **Указ Главы Республики Саха (Якутия) от 29.04.2021 №1840** «О схеме и программе развития электроэнергетики Республики Саха (Якутия) на 2021–2025 годы». [Электронный ресурс]: режим доступа: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/1400202104300005>.

175. **Указ Президента Российской Федерации от 07.05.2018 г. №204** «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года». [Электронный ресурс]: режим доступа: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/43027>.

176. **Указ Президента РФ от 13.05.2016 года №216** «Об утверждении Доктрины энергетической безопасности Российской Федерации». [Электронный ресурс]: режим доступа: <https://base.garant.ru/72240884/>.

177. **Указ Президента РФ от 28.02.2022 №79** (ред. от 09.06.2022, с изм. от 08.08.2022) «О применении специальных экономических мер в связи с недружественными действиями Соединенных Штатов Америки и примкнувших к ним иностранных государств и международных организаций». [Электронный ресурс]: режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_410417/.

178. **Унгурияну, Т.Н.** Краткие рекомендации по описанию, статистическому анализу и представлению данных в научных публикациях / Т.Н. Унгурияну, А.М. Гржибовский // Экология человека. – 2011. – №5. – С. 55–60. – EDN NRDBMN.

179. Управление Роспотребнадзора по РС(Я). О лабораторном мониторинге атмосферного воздуха в период лесных пожаров в Республике Саха (Якутия) на

10.07.2021 года на 09.00 часов. [Электронный ресурс]: режим доступа: <https://clck.ru/WGWUP>.

180. **Федеральный закон «О внесении изменений в Федеральный закон «Об электроэнергетике» в части развития микрогенерации»** от 27.12.2019 №471–ФЗ. [Электронный ресурс]: режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_341801/.

181. **Федеральный закон «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности, и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации»** от 23.11.2009 №261–ФЗ (последняя редакция). [Электронный ресурс]: режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_93978/.

182. **Фишов, А.Г.** Автоматическая настройка регуляторов частоты и обменной мощности в энергосистемах малой мощности. Осинцев А.А., Фролов М.Ю., Армеев Д.В., Мурашкина И.С. *iPolytech Journal*. 2022;26(1):102–116. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-1-102-116>.

183. **Флетани, А.** Влияние солнечного излучения на фотоэлектрические элементы в Дамаске, Сирия / А. Флетани // *Актуальные исследования*. – 2021. – №44(71). – С. 12–15. – EDN DMWFRT.

184. **Харченко, Н.В.** Индивидуальные солнечные установки. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – С. 208.

185. Цена на газ в Европе превысила \$3000 за тысячу куб. м. [Электронный ресурс]: режим доступа: <https://www.vedomosti.ru/business/news/2022/08/22/936971-tsena-na-gaz-previsila-3000>.

186. Центральные электрические сети Якутии. [Электронный ресурс]: режим доступа: http://museum.rao-esv.ru/power_facilities/198.

187. Цены на электроэнергию в Европе взлетели. [Электронный ресурс]: режим доступа: <https://www.forbes.ru/biznes/469557-ceny-na-elektroenergiu-v-evrope-vzleteli-do-sestimesacnogo-maksimuma>.

188. **Чеснокова, Т.Ю.** Применение рядов экспонент при моделировании широкополосных потоков солнечного излучения в атмосфере Земли / К.М. Фирсов, Ю.В. Воронина // Оптика атмосферы и океана. – 2007. – Т. 20. – №9. – С. 799–804. – EDN IBQLGR.

189. **Чиришьян, А.Р.** Правовые проблемы развития микрогенерации с использованием возобновляемых источников энергии / Чиришьян А.Р. // Власть Закона. – 2019. – № 3(39). – С. 228–233. – EDN DRPTYA.

190. **Шарипова, А.Р.** Эффективность децентрализации электроснабжения Северного энергорайона Республики Саха (Якутия) / А.Р. Шарипова, В.Р. Киушкина // Промышленная энергетика. – 2014. – № 4. – С. 2–6. – EDN SIVDZT.

191. **Элякова, И.Д.** Методы оценки влияния изменения тарифов на электрическую энергию на промышленных потребителей Республики Саха (Якутия) / И.Д. Элякова // Экономика и предпринимательство. – 2019. – № 6(107). – С. 534–537. – EDN ZUYVTG.

192. **Элякова, И.Д.** Объективные факторы перевода на электроотопление потребителей западного энергорайона Республики Саха (Якутия) / И.Д. Элякова, В.В. Барахова // Экономика и управление. – 2013. – № 11(97). – С. 53–57. – EDN RRUIJZL.

193. **Элякова, И.Д.** Прогноз потребления электрической энергии Республики Саха (Якутия) до 2030 года / И.Д. Элякова // Экономические стратегии. – 2009. – Т. 11. – №8(74). – С. 156–165. – EDN LHQWZX.

194. **Элякова, И.Д.** Состояние и проблемы энергетического комплекса Республики Саха (Якутия) / И.Д. Элякова, Д.И. Тимофеев // Индустриальная экономика. – 1999. – № 1. – С. 37–40. – EDN DIQBPC.

195. **Юдаев, И.В., Гамага В.В., Даус Ю.В.** Возобновляемые источники энергии. Учебное пособие. ЭБС Лань. ISBN: 978–5–8114–4680–3., 2020 г. С. 328.

196. **Яковенко, Н.А.** Солнечные водонагреватели, гелиоустановки, солнечные батареи и их КПД / А.В. Непомнящих, А.И. Забудский, В.Д. Червенчук // Роль научно–исследовательской работы обучающихся в развитии АПК: Сборник всероссийской (национальной) научно–практической конференции, Омск, 05

февраля 2020 года. – Омск: Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, 2020. – С. 343–348. – EDN UPOOGF.

197. **Abdi, H. Williams, L. J. Valentin, D.** (2013). Multiple factor analysis: Principal component analysis for multitable and multiblock data sets. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 5(2), P. 149–179. doi:10.1002/wics.1246.

198. All of the world's power plants, in one handy map. [Электронный ресурс]: режим доступа: <https://www.washingtonpost.com/news/wonk/wp/2012/12/08/all-of-the-worlds-power-plants-in-one-handy-map/>.

199. Annual sunshine hours map of the world [2753 × 1400]. [Электронный ресурс]: режим доступа: https://www.reddit.com/r/MapPorn/comments/44y90h/annual_sunshine_hours_map_of_the_world_2753_1400.

200. **Barbón, A.** Influence of solar tracking error on the performance of a small-scale linear Fresnel reflector / Barbón A., Bayón– Cueli C., Bayón L., Ayuso P.F. // *Renewable Energy* 2020. 162. P. 43–54. DOI: 10.1016/j.renene.2020.07.132.

201. **Carbonell, M.** Solar tracker operation and origins. URL: <https://www.hogarsense.es/energia-solar/seguidor-solar>.

202. **Cardot, H. Degras, D.** (2018). Online principal component analysis in high dimension: Which algorithm to choose? *International Statistical Review*, 86(1), 29– 50. doi:10.1111/insr.12220.

203. **Cernușcă, D.** Simulation of a high power photovoltaic park in MATLAB–Simulink / D. Cernușcă, R. Pentiu, C. Ungureanu [et al.] // *Вестник Казанского государственного энергетического университета*. – 2021. – Vol. 13. – No 3(51). – P. 61–68. – EDN NADSHV.

204. Self-regulatory organization in the field of energy audit (СПО–Э–150). [Электронный ресурс]: режим доступа: <https://sro150.ru/kalkulyatory/807-kalkulyator-vybrosov-dioksida-ugleroda-co-pri-ispolzovanii-energeticheskikh-resursov>.

205. **Faustino, C.R.** Cálculo de la Temperatura de Operación de Células Solares en un Panel Fotovoltaico Plano // Informes Técnicos Ciemat, Departamento de Energías Renovables Septiembre, 2002, P. 20– 25.
206. Global Hydrology and Climate Center of NASA. [Электронный ресурс]: режим доступа: http://www.ghcc.msfc.nasa.gov/ghcc_home.html.
207. Global Solar Atlas. [Электронный ресурс]: режим доступа: <https://globalsolaratlas.info/map?c=26.115986,49.042969,2>.
208. **Happ, C. Greven, S.** (2018). Multivariate functional principal component analysis for data observed on different (dimensional) domains. *Journal of the American Statistical Association*, 113(522), P. 649–659. doi:10.1080/01621459.2016.1273115.
209. IQAIR. [Электронный ресурс]: режим доступа: <https://clck.ru/WHouY>.
210. **Islam G. Md, S., A. Al-Durra, S. M. Muyeen, and J. Tamura.** «Low Voltage Ride through Capability Enhancement of Grid Connected Large Scale Photovoltaic System» IECON 2011 – 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Melbourne, Australia, November 7–10, 2011, P. 884–889.
211. **Ivanchenko, D. Smirnov, A.** Identification of interturn faults in power transformers by means of generalized symmetrical components analysis, (2019) E3S Web of Conferences, 140, paper № 04007. DOI: 10.1051/e3sconf/201914004007.
212. **Ivanchenko, D.I. Belsky, A.A. Dobush, V.S.** Application of Kalman filter for prevention of unrequired operation of power transformer differential protection. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. 1652(1). 012001.
213. **Johann, A.H.** Metodología para el análisis técnico de la masificación de sistemas fotovoltaicos como opción de generación distribuida en redes de baja tensión. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia 2012.
214. **Karaliolios, P. E. J. Coster, J. G. Slootweg, and W. L. Kling.** «The effect of Fault Ride-Through requirements on voltage dips and post-fault voltage recovery in a Dutch Distribution Network Key words» International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Spain.
215. **Kobayashi, H.** «Fault ride through requirements and measures of distributed PV systems in Japan» 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, P. 1–6.

216. **Kuvshinov V.V., L.M. Abd Ali, E.G. Kakushina, B. L. Krit, N.V. Morozova, V.V. Kuvshinova** / Studies of the PV Array Characteristics with Changing Array Surface Irradiance // Applied Solar Energy – 2019, Volume 55, Issue 4, P. 223–228. EDN: YLVBYI.
217. **Ma, Z.** (2013). Sparse principal component analysis and iterative thresholding. *Annals of Statistics*, 41(2), P. 772– 801. doi:10.1214/13– AOS1097.
218. **Malarev, V. Kopteva, A. Koptev, V. Gotsul Y.** Improvement of Efficiency of Steam– Thermal Treatment of High– Viscous Oil Formations Using Downhole Electric Steam Generators. *Journal of Ecological Engineering*. 2021. 22(2). P. 17–24.
219. **Palagushkin, B.V.** Short–term forecasting of wind and solar power generation / V. Z. Manusov, S. K. Khaldarov, B. V. Palagushkin // *Journal of Physics: Conference Series, Divnomorskoe*, 31 мая – 06 2021 года. – Divnomorskoe, 2021. – P. 052050. – DOI 10.1088/1742–6596/2131/5/052050. – EDN YHNNDG..
220. **Pedraza, J.M.** (2018). Focus on Renewable Energy Source, pp. 1– 59.
221. **Randy T Simmons, Lofthouse J., Ryan M. Yonk.** Reliability of renewable energy: solar. Institute of Political Economy (IPE) at Utah State University. 2016. V. 1.
222. **Sierra, E.** Solarimetría // *Fundamentos de Energia Solar Termica*, CI 4230513– 5 Nov. 2010.
223. **Skaloumpakas, K.** «Response of Low Voltage Networks with High Photovoltaic Systems Penetration to Transmission Network Faults» in Faculty of Applied Science, vol. M. Sc. thesis in Sustainable Energy Technology. Netherland, 2014.
224. **Sowa S.** Improving the energy efficiency of lighting systems by the use of solar radiation. 17th International Conference Heat Transfer and Renewable Sources of Energy (HTRSE–2018). 03 December 2018.
225. **Szulc–Wronska A., Tomaszewska B.** Investigation of use small wind turbines under local wind conditions in Rabka–Zdroj. 6th International Conference – Renewable Energy Sources (ICoRES 2019). 09 March 2020.

ПРИЛОЖЕНИЕ «А»
АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ НАУЧНЫХ И ПРАКТИЧЕСКИХ РЕЗУЛЬТАТОВ
ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям
СВФУ, с.п.

УТВЕРЖДАЮ

Первый заместитель министра
ЖКХ и энергетики
Республики Саха (Якутия)

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы
Местникова Николая Петровича на тему:
 «Разработка и исследование способов повышения энергоэффективности
 солнечных электростанций в условиях Севера»

г. Якутск

10 01 2024 г.

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Местникова Николая Петровича, разработанной на кафедре «Электроснабжение» Физико-технического института СВФУ, внедрены в методическую и текущую деятельность Министерства жилищно-коммунального хозяйства и энергетики Республики Саха (Якутия).

Под внедрением подразумевается передача с последующим применением сотрудниками Министерства следующих материалов, полученных на основе результатов диссертационной работы Местникова Николая Петровича:

1. Характер и показатели влияния внешних факторов Севера на рабочие характеристики солнечных электростанций, функционирующих в автономных энергосистемах.

Перечень учебно-методической литературы:

2. Местников, Н. П. Солнечная энергетика в условиях Севера и Арктики: Учебное пособие по дисциплине «Общая энергетика» и факультативу «Основы энергосбережения и ресурсоэффективности в условиях Севера» / Н. П. Местников; Министерство науки и высшего образования РФ, СВФУ им. М.К. Аммосова – Якутск: Издательский дом СВФУ, 2022. – 94 с. – ISBN 978-5-7513-3304-1. – EDN WAUTBU.

3. Местников, Н. П. Прикладная гелиоэнергетика в условиях Севера: Учебное пособие в 3 частях по дисциплине «Общая энергетика» и факультативу «Основы энергосбережения и ресурсоэффективности в условиях Севера» / Н. П. Местников; Министерство науки и высшего образования РФ, СВФУ им. М.К. Аммосова. Том Часть 1. – Якутск: Издательский дом СВФУ, 2023. – 102 с. – ISBN 978-5-7513-3531-1.

4. Местников, Н. П. Особенности эксплуатации солнечных электростанций микромощности в условиях Севера / Н. П. Местников; Министерство науки и высшего образования РФ, СВФУ им. М.К. Аммосова – Якутск, 2022. – 155 с. – ISBN 978-5-7513-3359-1. – EDN ТКТҮРХ.

Результаты диссертационной работы Местникова Николая Петровича в области возобновляемых источников энергии имеют высокую актуальность и прикладную востребованность.

От СВФУ:

_____/ Васильев П.Ф./
 _____/ Местников Н.П./

От Министерства ЖКХ и энергетики РС(Я):

_____/

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям
СВФУ, к.т.н., доцент

Н.Э. Соловьев/

2024 г.

УТВЕРЖДАЮ

Директор ГАУ РС(Я) «Центр
развития ЖКХ и повышения
энергоэффективности»

/Н.П. Сивцева/

«15» 01 2024 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы

Местникова Николая Петровича на тему:

«Разработка и исследование способов повышения энергоэффективности
солнечных электростанций в условиях Севера»

г. Якутск

«15» 01 2024 г.

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Местникова Николая Петровича, разработанной на кафедре «Электроснабжение» Физико-технического института СВФУ, внедрены в методическую и текущую деятельность ГАУ РС(Я) «Центр развития ЖКХ и повышения энергоэффективности».

Под внедрением подразумевается передача с последующим применением сотрудниками Центра следующих материалов, полученных на основе результатов диссертационной работы Местникова Николая Петровича:

1. Дополненная методика расчета рабочих параметров солнечных электростанций, учитывающая внешние факторы Севера и повышающая точность расчетов.

2. Математическая модель функционирования солнечной электростанции, учитывающая внешние факторы Севера и позволяющая выполнить оценку ее рабочих параметров и технико-экономических показателей

Перечень учебно-методической литературы:

3. Местников, Н. П. Солнечная энергетика в условиях Севера и Арктики: Учебное пособие по дисциплине «Общая энергетика» и факультативу «Основы энергосбережения и ресурсоэффективности в условиях Севера» / Н. П. Местников ; Министерство науки и высшего образования РФ, СВФУ им. М.К. Аммосова – Якутск: Издательский дом СВФУ, 2022. – 94 с. – ISBN 978-5-7513-3304-1. – EDN WAUTBU.

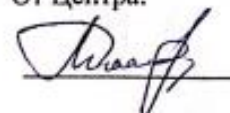
4. Местников, Н. П. Прикладная гелиоэнергетика в условиях Севера: Учебное пособие в 3 частях по дисциплине «Общая энергетика» и факультативу «Основы энергосбережения и ресурсоэффективности в условиях Севера» / Н. П. Местников; Министерство науки и высшего образования РФ, СВФУ им. М.К. Аммосова. Часть 1. – Якутск: Издательский дом СВФУ, 2023. – 102 с. – ISBN 978-5-7513-3531-1.

Результаты диссертационной работы Местникова Николая Петровича по возобновляемым источникам энергии имеют высокую актуальность и прикладную востребованность в области жилищно-коммунального хозяйства и энергетики.

От СВФУ:

 / Васильев П.Ф./
 / Местников Н.П./

От Центра:

 / Киндигцев А.В.

УТВЕРЖДАЮ

Проректор СВФУ по инновациям

М.Э. Сваровцев/

«16»



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ООО «ЯкутскЭКОСети»

В.В. Созонь/

«16»



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы

Местникова Николая Петровича на тему:**«Разработка и исследование способов повышения энергоэффективности
солнечных электростанций в условиях Севера»**

г. Якутск

«16» 01 2024 г.

Настоящий акт составлен о том, что разработанный в кафедре «Электроснабжение» ФТИ СВФУ способ повышения выработки электроэнергии от солнечной электростанции внедрен в комплекс мероприятий по устойчивой эксплуатации, строящейся системы электроснабжения нового городского полигона размещения ТКО в г. Якутске, в составе которой внедряется солнечная электростанция установленной мощностью 10 кВт.

Сущность разработанного способа заключается в размещении фотоэлектрических панелей по дугообразной форме со строгой ориентацией на солнечную (южную) сторону, где угол размещения между боковыми панелями составляет не более 30° . После внедрения разработанного способа выработка электроэнергии от солнечной электростанции увеличивается на 30...35%. Определение эффекта внедрения выполнена посредством проведения натурных исследований в течение 60 суток в условиях окружающей среды.

Разработанный способ позволяет обеспечить надежное функционирование и стабильную выработку солнечных электростанций в весенне-летний период на территории Севера. Способ актуален для практического применения в объектах солнечной энергетики микро- и малой мощности.

От СВФУ

/ Васильев П.Ф./

/ Местников Н.П./

От ООО «ЯКУТСКЭКОСЕТИ»

/ Григорьева В.А./

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по науке и инновациям
СВФУ, к.т.н., доцент

/Е.Э. Соловьев/

2024 г.

УТВЕРЖДАЮ

Директор ФТИ СВФУ
к.ф.-м.н.

/Д.В. Николаев/

2024 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы

Местникова Николая Петровича на тему:**«Разработка и исследование способов повышения энергоэффективности
солнечных электростанций в условиях Севера»**

г. Якутск

«12» 01 2024 г.

Настоящий акт составлен о том, что следующий перечень учебно-методической литературы, разработанный на основе результатов диссертационной работы Местникова Николая Петровича, внедрены в учебный процесс Физико-технического института:



1. Местников, Н.П. Возобновляемые источники энергии в условиях Севера: Учебное пособие по дисциплине «Общая энергетика» и факультативу «Основы энергосбережения и ресурсоэффективности в условиях Севера» / Н. П. Местников; Министерство науки и высшего образования РФ; ФГАОУ ВО «СВФУ им. М.К. Аммосова» Физико-технический институт. Том Часть 2. – Якутск: ООО РИЦ "Офсет", 2021. – 107 с. – ISBN 978-5-91441-325-2. – EDN QPVMNB.

2. Местников, Н.П. Солнечная энергетика в условиях Севера и Арктики: Учебное пособие по дисциплине «Общая энергетика» и факультативу «Основы энергосбережения и ресурсоэффективности в условиях Севера» / Н. П. Местников; Министерство науки и высшего образования РФ, СВФУ им. М.К. Аммосова, Физико-технический институт. – Якутск: Издательский дом СВФУ, 2022. – 94 с. – ISBN 978-5-7513-3304-1. – EDN WAUTBU.


3. Местников, Н.П. Прикладная гелиоэнергетика в условиях Севера: Учебное пособие в 3 частях по дисциплине «Общая энергетика» и факультативу «Основы энергосбережения и ресурсоэффективности в условиях Севера» / Н. П. Местников; Министерство науки и высшего образования РФ, СВФУ им. М.К. Аммосова, Физико-технический институт, Кафедра «Электроснабжение». Том Часть 1. – Якутск: Издательский дом СВФУ, 2023. – 102 с. – ISBN 978-5-7513-3531-1.

Данный перечень учебно-методической литературы применяется в лекционных и практических занятиях по дисциплинам «Общая энергетика», «Системы электроснабжения» и «Основы проектной деятельности».

От СВФУ

 / Васильев П.Ф./
 / Местников Н.П./

От ФТИ СВФУ

 / Платонова В.А./

ПРИЛОЖЕНИЕ «Б»

РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2794626

**Способ повышения электроэнергетической
эффективности солнечной электростанции микро- и
малой мощности**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки Федеральный исследовательский
центр "Якутский научный центр Сибирского отделения
Российской академии наук" (RU)*

Авторы: *Местников Николай Петрович (RU), Васильев
Павел Филиппович (RU)*

Заявка № 2022126618

Приоритет изобретения **13 октября 2022 г.**
Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации **24 апреля 2023 г.**
Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **13 октября 2042 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 68b80077e14e40f0a94eabd24145d5c7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 20.05.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020667411

**«Программа расчета электроэнергетических параметров
солнечной электростанции на территории Якутии»**

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
"Северо-Восточный федеральный университет имени
М.К.Аммосова" (RU)*

Авторы: *Местников Николай Петрович (RU), Васильев Павел
Филиппович (RU), Бурянина Надежда Сергеевна (RU), Королюк
Юрий Федорович (RU)*

Заявка № 2020666310

Дата поступления 12 декабря 2020 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 23 декабря 2020 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2021615502

**«Программа расчета электроэнергетических параметров
солнечной электростанции для питания фермерского
хозяйства на территории Севера и Арктики»**

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
"Северо-Восточный федеральный университет имени
М.К.Аммосова" (RU)*

Авторы: *Местников Николай Петрович (RU), Васильев
Павел Филиппович (RU)*

Заявка № 2021614435

Дата поступления 02 апреля 2021 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 08 апреля 2021 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев



ПРИЛОЖЕНИЕ «В»

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ Т–КРИТЕРИЯ СТЬЮДЕНТА

Таблица В.1 – Показатели выборки в виде изменения генерирующей мощности ФЭП вследствие влияния поверхностного загрязнения пылью

№	Выборки		Отклонения от среднего		Квадраты отклонений	
	В.1 Р _{чист.} , Вт/м ²	В.2 Р _{загр.} , Вт/м ²	В.1 Р _{чист.} , Вт/м ²	В.2 Р _{загр.} , Вт/м ²	В.1 Р _{чист.} , Вт/м ²	В.2 Р _{загр.} , Вт/м ²
1	1.16	0.65	-38.32	-21.4	1468.4224	457.96
2	8.33	4.65	-31.15	-17.4	970.3225	302.76
3	12.01	6.71	-27.47	-15.34	754.6009	235.3156
4	16.95	9.47	-22.53	-12.58	507.6009	158.2564
5	29.35	16.39	-10.13	-5.66	102.6169	32.0356
6	31.77	17.74	-7.71	-4.31	59.4441	18.5761
7	34.38	19.20	-5.1	-2.85	26.01	8.1225
8	36.03	20.12	-3.45	-1.93	11.9025	3.7249
9	37.48	20.93	-2	-1.12	4	1.2544
10	41.36	23.10	1.88	1.05	3.5344	1.1025
11	40.77	22.77	1.29	0.72	1.6641	0.5184
12	45.04	25.15	5.56	3.1	30.9136	9.61
13	50.17	28.02	10.69	5.97	114.2761	35.6409
14	49.30	27.53	9.82	5.48	96.4324	30.0304
15	50.65	28.29	11.17	6.24	124.7689	38.9376
16	57.72	32.24	18.24	10.19	332.6976	103.8361
17	58.89	32.89	19.41	10.84	376.7481	117.5056
18	59.18	33.05	19.7	11	388.09	121
19	61.79	34.51	22.31	12.46	497.7361	155.2516
20	63.24	35.32	23.76	13.27	564.5376	176.0929
21	64.41	35.97	24.93	13.92	621.5049	193.7664
22	65.67	36.67	26.19	14.62	685.9161	213.7444
23	66.05	36.89	26.57	14.84	705.9649	220.2256
24	67.22	37.54	27.74	15.49	769.5076	239.9401
25	66.54	37.16	27.06	15.11	732.2436	228.3121
26	66.05	36.89	26.57	14.84	705.9649	220.2256
27	65.38	36.51	25.9	14.46	670.81	209.0916
28	60.15	33.59	20.67	11.54	427.2489	133.1716
29	59.56	33.27	20.08	11.22	403.2064	125.8884
30	59.27	33.10	19.79	11.05	391.6441	122.1025
31	58.60	32.73	19.12	10.68	365.5744	114.0624
32	50.75	28.34	11.27	6.29	127.0129	39.5641
33	49.49	27.64	10.01	5.59	100.2001	31.2481
34	45.04	25.15	5.56	3.1	30.9136	9.61
35	41.84	23.37	2.36	1.32	5.5696	1.7424
36	30.90	17.26	-8.58	-4.79	73.6164	22.9441
37	24.99	13.96	-14.49	-8.09	209.9601	65.4481
38	22.57	12.60	-16.91	-9.45	285.9481	89.3025
39	17.82	9.95	-21.66	-12.1	469.1556	146.41

№	Выборки		Отклонения от среднего		Квадраты отклонений	
	В.1 Р _{чист.} , Вт/м ²	В.2 Р _{загр.} , Вт/м ²	В.1 Р _{чист.} , Вт/м ²	В.2 Р _{загр.} , Вт/м ²	В.1 Р _{чист.} , Вт/м ²	В.2 Р _{загр.} , Вт/м ²
40	15.40	8.60	-24.08	-13.45	579.8464	180.9025
41	14.14	7.90	-25.34	-14.15	642.1156	200.2225
42	5.81	3.25	-33.67	-18.8	1133.6689	353.44
43	4.65	2.60	-34.83	-19.45	1213.1289	378.3025
44	3.49	1.95	-35.99	-20.1	1295.2801	404.01
45	3.49	1.95	-35.99	-20.1	1295.2801	404.01
46	1.16	0.65	-38.32	-21.4	1468.4224	457.96

Таблица В.2 – Показатели выборки в виде изменения генерирующей мощности ФЭП вследствие влияния поверхностного загрязнения снеговым покровом

№	Выборки		Отклонения от среднего		Квадраты отклонений	
	В.1 Р _{чист.} , Вт/м ²	В.2 Р _{загр.} , Вт/м ²	В.1 Р _{чист.} , Вт/м ²	В.2 Р _{загр.} , Вт/м ²	В.1 Р _{чист.} , Вт/м ²	В.2 Р _{загр.} , Вт/м ²
1	1.05	0.14	-43.42	-5.64	1885.2964	31.8096
2	7.52	0.98	-36.95	-4.8	1365.3025	23.04
3	10.84	1.41	-33.63	-4.37	1130.9769	19.0969
4	15.30	1.99	-29.17	-3.79	850.8889	14.3641
5	26.49	3.44	-17.98	-2.34	323.2804	5.4756
6	28.67	3.73	-15.8	-2.05	249.64	4.2025
7	31.03	4.03	-13.44	-1.75	180.6336	3.0625
8	32.26	4.19	-12.21	-1.59	149.0841	2.5281
9	34.53	4.49	-9.94	-1.29	98.8036	1.6641
10	38.90	5.06	-5.57	-0.72	31.0249	0.5184
11	39.95	5.19	-4.52	-0.59	20.4304	0.3481
12	41.00	5.33	-3.47	-0.45	12.0409	0.2025
13	44.49	5.78	0.02000003	0	0.0004	0
14	47.81	6.22	3.34	0.44	11.1556	0.1936
15	47.73	6.20	3.26	0.42	10.6276	0.1764
16	51.31	6.67	6.84	0.89	46.7856	0.7921
17	52.62	6.84	8.15	1.06	66.4225	1.1236
18	52.80	6.86	8.33	1.08	69.3889	1.1664
19	56.29	7.32	11.82	1.54	139.7124	2.3716
20	56.38	7.33	11.91	1.55	141.8481	2.4025
21	58.65	7.63	14.18	1.85	201.0724	3.4225
22	56.47	7.34	12	1.56	144	2.4336
23	59.88	7.78	15.41	2	237.4681	4
24	57.60	7.49	13.13	1.71	172.3969	2.9241

№	Выборки		Отклонения от среднего		Квадраты отклонений	
	В.1 Р _{чист.} , Вт/м ²	В.2 Р _{загр.} , Вт/м ²	В.1 Р _{чист.} , Вт/м ²	В.2 Р _{загр.} , Вт/м ²	В.1 Р _{чист.} , Вт/м ²	В.2 Р _{загр.} , Вт/м ²
25	58.92	7.66	14.45	1.88	208.8025	3.5344
26	57.69	7.50	13.22	1.72	174.7684	2.9584
27	59.88	7.78	15.41	2	237.4681	4
28	63.55	8.26	19.08	2.48	364.0464	6.1504
29	63.72	8.28	19.25	2.5	370.5625	6.25
30	61.36	7.98	16.89	2.2	285.2721	4.84
31	57.95	7.53	13.48	1.75	181.7104	3.0625
32	57.26	7.44	12.79	1.66	163.5841	2.7556
33	56.99	7.41	12.52	1.63	156.7504	2.6569
34	52.27	6.80	7.8	1.02	60.84	1.0404
35	52.45	6.82	7.98	1.04	63.6804	1.0816
36	53.50	6.95	9.03	1.17	81.5409	1.3689
37	47.81	6.22	3.34	0.44	11.1556	0.1936
38	49.91	6.49	5.44	0.71	29.5936	0.5041
39	47.73	6.20	3.26	0.42	10.6276	0.1764
40	45.54	5.92	1.07	0.14	1.1449	0.0196
41	41.87	5.44	-2.6	-0.34	6.76	0.1156
42	40.65	5.28	-3.82	-0.5	14.5924	0.25
43	38.20	4.97	-6.27	-0.81	39.3129	0.6561
44	36.98	4.81	-7.49	-0.97	56.1001	0.9409
45	33.65	4.38	-10.82	-1.4	117.0724	1.96
46	33.48	4.35	-10.99	-1.43	120.7801	2.0449
47	29.11	3.78	-15.36	-2	235.9296	4
Суммы:	2090.04	271.69	-0.05	0.03	10530.3765	177.8791

Таблица В.3 – Показатели выборки в виде изменения генерирующей мощности ФЭП вследствие влияния лесных пожаров

№	Выборки		Отклонения от среднего		Квадраты отклонений	
	В.1 Р _{чист.} , Вт/м ²	В.2 Р _{дым.} , Вт/м ²	В.1 Р _{чист.} , Вт/м ²	В.2 Р _{дым.} , Вт/м ²	В.1 Р _{чист.} , Вт/м ²	В.2 Р _{дым.} , Вт/м ²
1	1.26	0.00	-10.47	-48.08	109.6209	2311.6864
2	0.00	0.00	-11.73	-48.08	137.5929	2311.6864
3	0.00	0.00	-11.73	-48.08	137.5929	2311.6864
4	1.26	0.00	-10.47	-48.08	109.6209	2311.6864
5	1.37	0.00	-10.36	-48.08	107.3296	2311.6864
6	4.11	0.00	-7.62	-48.08	58.0644	2311.6864
7	2.74	1.37	-8.99	-46.71	80.8201	2181.8241
8	2.74	9.83	-8.99	-38.25	80.8201	1463.0625
9	2.74	14.17	-8.99	-33.91	80.8201	1149.8881
10	5.49	20.00	-6.24	-28.08	38.9376	788.4864

№	Выборки		Отклонения от среднего		Квадраты отклонений	
	В.1 Р _{чист} , Вт/м ²	В.2 Р _{дым} , Вт/м ²	В.1 Р _{чист} , Вт/м ²	В.2 Р _{дым} , Вт/м ²	В.1 Р _{чист} , Вт/м ²	В.2 Р _{дым} , Вт/м ²
11	6.97	34.63	-4.76	-13.45	22.6576	180.9025
12	4.11	37.49	-7.62	-10.59	58.0644	112.1481
13	8.34	40.57	-3.39	-7.51	11.4921	56.4001
14	5.49	42.17	-6.24	-5.91	38.9376	34.9281
15	11.09	45.14	-0.64	-2.94	0.4096	8.6436
16	11.09	50.86	-0.64	2.78	0.4096	7.7284
17	11.09	49.26	-0.64	1.18	0.4096	1.3924
18	11.20	53.60	-0.53	5.52	0.2809	30.4704
19	13.94	58.17	2.21	10.09	4.8841	101.8081
20	15.43	62.51	3.7	14.43	13.69	208.2249
21	16.80	62.40	5.07	14.32	25.7049	205.0624
22	12.57	67.09	0.84	19.01	0.7056	361.3801
23	11.20	68.80	-0.53	20.72	0.2809	429.3184
24	11.20	69.03	-0.53	20.95	0.2809	438.9025
25	8.34	73.60	-3.39	25.52	11.4921	651.2704
26	9.71	73.71	-2.02	25.63	4.0804	656.8969
27	11.20	76.69	-0.53	28.61	0.2809	818.5321
28	9.83	73.83	-1.9	25.75	3.61	663.0625
29	8.34	78.29	-3.39	30.21	11.4921	912.6441
30	9.83	75.31	-1.9	27.23	3.61	741.4729
31	11.20	77.03	-0.53	28.95	0.2809	838.1025
32	12.57	75.43	0.84	27.35	0.7056	748.0225
33	9.83	78.29	-1.9	30.21	3.61	912.6441
34	15.43	83.09	3.7	35.01	13.69	1225.7001
35	18.40	83.31	6.67	35.23	44.4889	1241.1529
36	17.03	80.23	5.3	32.15	28.09	1033.6225
37	17.03	75.77	5.3	27.69	28.09	766.7361
38	24.23	77.37	12.5	29.29	156.25	857.9041
39	28.57	74.51	16.84	26.43	283.5856	698.5449
40	21.37	68.34	9.64	20.26	92.9296	410.4676
41	27.09	68.57	15.36	20.49	235.9296	419.8401
42	24.34	69.94	12.61	21.86	159.0121	477.8596
43	28.69	62.51	16.96	14.43	287.6416	208.2249
44	30.06	65.26	18.33	17.18	335.9889	295.1524
45	27.31	62.40	15.58	14.32	242.7364	205.0624
46	25.83	59.54	14.1	11.46	198.81	131.3316
47	22.97	54.74	11.24	6.66	126.3376	44.3556
48	21.60	53.14	9.87	5.06	97.4169	25.6036
49	18.63	49.94	6.9	1.86	47.61	3.4596
50	17.26	48.34	5.53	0.261	30.5809	0.0676
51	17.94	44.00	6.21	-4.08	38.5641	16.6464
52	12.34	43.77	0.61	-4.31	0.3721	18.5761
53	8.23	38.06	-3.5	-10.02	12.25	100.4004
54	8.11	33.71	-3.62	-14.37	13.1044	206.4969
55	6.74	29.49	-4.99	-18.59	24.9001	345.5881
56	0.00	26.63	-11.73	-21.45	137.5929	460.1025
57	1.37	21.03	-10.36	-27.05	107.3296	731.7025
58	0.00	18.17	-11.73	-29.91	137.5929	894.6081

№	Выборки		Отклонения от среднего		Квадраты отклонений	
	В.1 Р _{чист} , Вт/м ²	В.2 Р _{дым} , Вт/м ²	В.1 Р _{чист} , Вт/м ²	В.2 Р _{дым} , Вт/м ²	В.1 Р _{чист} , Вт/м ²	В.2 Р _{дым} , Вт/м ²
59	0.00	16.69	-11.73	-31.39	137.5929	985.3321
60	0.00	6.86	-11.73	-41.22	137.5929	1699.0884
Суммы:	703.65	2884.68	-0.15	-0.12	4314.6693	42076.9646

Таблица В.4 – Показатели выборки в виде изменения генерирующей мощности ФЭП вследствие влияния облачности

№	Выборки		Отклонения от среднего		Квадраты отклонений	
	В.1 Р _{чист} , Вт/м ²	В.2 Р _{обл} , Вт/м ²	В.1 Р _{чист} , Вт/м ²	В.2 Р _{обл} , Вт/м ²	В.1 Р _{чист} , Вт/м ²	В.2 Р _{обл} , Вт/м ²
1	0.946	0.050	-40.134	-2.1	1610.738	4.41
2	1.051	0.055	-40.029	-2.095	1602.3208	4.389
3	1.261	0.066	-39.819	-2.084	1585.5528	4.3431
4	9.039	0.474	-32.041	-1.676	1026.6257	2.809
5	13.033	0.683	-28.047	-1.467	786.6342	2.1521
6	18.394	0.964	-22.686	-1.186	514.6546	1.4066
7	31.848	1.669	-9.232	-0.481	85.2298	0.2314
8	34.476	1.807	-6.604	-0.343	43.6128	0.1176
9	37.314	1.956	-3.766	-0.194	14.1828	0.0376
10	38.785	2.033	-2.295	-0.117	5.267	0.0137
11	41.518	2.176	0.438	0.026	0.1918	0.0007
12	46.773	2.451	5.693	0.301	32.4102	0.0906
13	45.302	2.374	4.222	0.224	17.8253	0.0502
14	49.296	2.584	8.216	0.434	67.5027	0.1884
15	53.500	2.804	12.42	0.654	154.2564	0.4277
16	57.494	3.013	16.414	0.863	269.4194	0.7448
17	57.389	3.008	16.309	0.858	265.9835	0.7362
18	58.440	3.063	17.36	0.913	301.3696	0.8336
19	63.275	3.316	22.195	1.166	492.618	1.3596
20	63.486	3.327	22.406	1.177	502.0288	1.3853
21	67.690	3.548	26.61	1.398	708.0921	1.9544
22	67.795	3.553	26.715	1.403	713.6912	1.9684
23	70.528	3.696	29.448	1.546	867.1847	2.3901
24	67.900	3.559	26.82	1.409	719.3124	1.9853
25	71.999	3.773	30.919	1.623	955.9846	2.6341
26	69.267	3.630	28.187	1.48	794.507	2.1904
27	70.843	3.713	29.763	1.563	885.8362	2.443
28	69.372	3.636	28.292	1.486	800.4373	2.2082
29	71.999	3.773	30.919	1.623	955.9846	2.6341
30	76.414	4.005	35.334	1.855	1248.4916	3.441
31	76.624	4.016	35.544	1.866	1263.3759	3.482
32	73.786	3.867	32.706	1.717	1069.6824	2.9481
33	69.687	3.652	28.607	1.502	818.3604	2.256
34	71.159	3.729	30.079	1.579	904.7462	2.4932
35	68.531	3.592	27.451	1.442	753.5574	2.0794
36	62.855	3.294	21.775	1.144	474.1506	1.3087
37	63.065	3.305	21.985	1.155	483.3402	1.334

№	Выборки		Отклонения от среднего		Квадраты отклонений	
	В.1 Р _{чист} , Вт/м ²	В.2 Р _{обл} , Вт/м ²	В.1 Р _{чист} , Вт/м ²	В.2 Р _{обл} , Вт/м ²	В.1 Р _{чист} , Вт/м ²	В.2 Р _{обл} , Вт/м ²
38	64.326	3.371	23.246	1.221	540.3765	1.4908
39	57.494	3.013	16.414	0.863	269.4194	0.7448
40	60.017	3.145	18.937	0.995	358.61	0.99
41	57.389	3.008	16.309	0.858	265.9835	0.7362
42	54.762	2.870	13.682	0.72	187.1971	0.5184
43	50.347	2.639	9.267	0.489	85.8773	0.2391
44	48.875	2.561	7.795	0.411	60.762	0.1689
45	45.932	2.407	4.852	0.257	23.5419	0.066
46	44.461	2.330	3.381	0.18	11.4312	0.0324
47	40.467	2.121	-0.613	-0.029	0.3758	0.0008
48	40.257	2.110	-0.823	-0.04	0.6773	0.0016
49	35.001	1.834	-6.079	-0.316	36.9542	0.0999
50	31.007	1.625	-10.073	-0.525	101.4653	0.2756
51	27.118	1.421	-13.962	-0.729	194.9374	0.5314
52	24.490	1.283	-16.59	-0.867	275.2281	0.7517
53	19.340	1.014	-21.74	-1.136	472.6276	1.2905
54	16.712	0.876	-24.368	-1.274	593.7994	1.6231
55	15.346	0.804	-25.734	-1.346	662.2388	1.8117
56	6.307	0.331	-34.773	-1.819	1209.1615	3.3088
57	5.045	0.264	-36.035	-1.886	1298.5212	3.557
58	3.784	0.198	-37.296	-1.952	1390.9916	3.8103
59	3.784	0.198	-37.296	-1.952	1390.9916	3.8103
60	1.261	0.066	-39.819	-2.084	1585.5528	4.3431
61	1.156	0.061	-39.924	-2.089	1593.9258	4.3639
62	1.051	0.055	-40.029	-2.095	1602.3208	4.389
63	0.946	0.050	-40.134	-2.1	1610.738	4.41
64	0.736	0.039	-40.344	-2.111	1627.6383	4.4563
65	0.526	0.028	-40.554	-2.122	1644.6269	4.5029
Суммы:	2670.071	139.936	-0.129	0.186	42891.1303	117.8021

Таблица В.5 – Показатели выборки в виде изменения генерирующей мощности ФЭП вследствие влияния температуры воздушной среды

№	Выборки		Отклонения от среднего		Квадраты отклонений	
	В.1 Р ₍₋₆₀₎ , Вт/м ²	В.2 Р ₍₊₃₀₎ , Вт/м ²	В.1 Р ₍₋₆₀₎ , Вт/м ²	В.2 Р ₍₊₃₀₎ , Вт/м ²	В.1 Р ₍₋₆₀₎ , Вт/м ²	В.2 Р ₍₊₃₀₎ , Вт/м ²
1	0.34	-7.00	-120.22	2475.18	14452.8484	6126516.0324
2	1.02	-21.00	-119.54	2461.18	14289.8116	6057406.9924
3	2.72	-56.00	-117.84	2426.18	13886.2656	5886349.3924
4	2.38	-49.00	-118.18	2433.18	13966.5124	5920364.9124
5	3.40	-70.00	-117.16	2412.18	13726.4656	5818612.3524
6	3.06	-63.00	-117.5	2419.18	13806.25	5852431.8724
7	4.08	-84.00	-116.48	2398.18	13567.5904	5751267.3124
8	8.16	-168.00	-112.4	2314.18	12633.76	5355429.0724
9	8.50	-175.00	-112.06	2307.18	12557.4436	5323079.5524
10	11.90	-245.00	-108.66	2237.18	11806.9956	5004974.3524
11	29.24	-602.00	-91.32	1880.18	8339.3424	3535076.8324
12	42.16	-868.00	-78.4	1614.18	6146.56	2605577.0724

№	Выборки		Отклонения от среднего		Квадраты отклонений	
	В.1 $P_{(-60)}$, Вт/м ²	В.2 $P_{(+30)}$, Вт/м ²	В.1 $P_{(-60)}$, Вт/м ²	В.2 $P_{(+30)}$, Вт/м ²	В.1 $P_{(-60)}$, Вт/м ²	В.2 $P_{(+30)}$, Вт/м ²
13	59.50	-1225.00	-61.06	1257.18	3728.3236	1580501.5524
14	103.02	-2121.00	-17.54	361.18	307.6516	130450.9924
15	111.52	-2296.00	-9.04	186.18	81.7216	34662.9924
16	120.70	-2485.00	0.14	-2.82002	0.0196	7.9524
17	125.46	-2583.00	4.9	-100.82	24.01	10164.6724
18	134.30	-2765.00	13.74	-282.82	188.7876	79987.1524
19	151.30	-3115.00	30.74	-632.82	944.9476	400461.1524
20	146.54	-3017.00	25.98	-534.82	674.9604	286032.4324
21	159.46	-3283.00	38.9	-800.82	1513.21	641312.6724
22	173.06	-3563.00	52.5	-1080.82	2756.25	1168171.8724
23	185.98	-3829.00	65.42	-1346.82	4279.7764	1813924.1124
24	185.64	-3822.00	65.08	-1339.82	4235.4064	1795117.6324
25	189.04	-3892.00	68.48	-1409.82	4689.5104	1987592.4324
26	204.68	-4214.00	84.12	-1731.82	7076.1744	2999200.5124
27	205.36	-4228.00	84.8	-1745.82	7191.04	3047887.4724
28	218.96	-4508.00	98.4	-2025.82	9682.56	4103946.6724
29	219.30	-4515.00	98.74	-2032.82	9749.5876	4132357.1524
30	228.14	-4697.00	107.58	-2214.82	11573.4564	4905427.6324
31	219.64	-4522.00	99.08	-2039.82	9816.8464	4160865.6324
32	232.90	-4795.00	112.34	-2312.82	12620.2756	5349136.3524
33	224.06	-4613.00	103.5	-2130.82	10712.25	4540393.8724
34	229.16	-4718.00	108.6	-2235.82	11793.96	4998891.0724
35	224.40	-4620.00	103.84	-2137.82	10782.7456	4570274.3524
36	232.90	-4795.00	112.34	-2312.82	12620.2756	5349136.3524
37	247.18	-5089.00	126.62	-2606.82	16032.6244	6795510.5124
38	247.86	-5103.00	127.3	-2620.82	16205.29	6868697.4724
39	238.68	-4914.00	118.12	-2431.82	13952.3344	5913748.5124
40	225.42	-4641.00	104.86	-2158.82	10995.6196	4660503.7924
41	230.18	-4739.00	109.62	-2256.82	12016.5444	5093236.5124
42	221.68	-4564.00	101.12	-2081.82	10225.2544	4333974.5124
43	203.32	-4186.00	82.76	-1703.82	6849.2176	2903002.5924
44	204.00	-4200.00	83.44	-1717.82	6962.2336	2950905.5524
45	208.08	-4284.00	87.52	-1801.82	7659.7504	3246555.3124
46	185.98	-3829.00	65.42	-1346.82	4279.7764	1813924.1124
47	194.14	-3997.00	73.58	-1514.82	5414.0164	2294679.6324
48	185.64	-3822.00	65.08	-1339.82	4235.4064	1795117.6324
49	177.14	-3647.00	56.58	-1164.82	3201.2964	1356805.6324
50	162.86	-3353.00	42.3	-870.82	1789.29	758327.4724
51	158.10	-3255.00	37.54	-772.82	1409.2516	597250.7524
52	148.58	-3059.00	28.02	-576.82	785.1204	332721.3124
53	143.82	-2961.00	23.26	-478.82	541.0276	229268.5924
54	130.90	-2695.00	10.34	-212.82	106.9156	45292.3524
55	130.22	-2681.00	9.66	-198.82	93.3156	39529.3924
56	113.22	-2331.00	-7.34	151.18	53.8756	22855.3924
57	100.30	-2065.00	-20.26	417.18	410.4676	174039.1524
58	87.72	-1806.00	-32.84	676.18	1078.4656	457219.3924
59	79.22	-1631.00	-41.34	851.18	1708.9956	724507.3924
60	62.56	-1288.00	-58	1194.18	3364	1426065.8724
61	54.06	-1113.00	-66.5	1369.18	4422.25	1874653.8724
62	49.64	-1022.00	-70.92	1460.18	5029.6464	2132125.6324
63	20.40	-420.00	-100.16	2062.18	10032.0256	4252586.3524
64	16.32	-336.00	-104.24	2146.18	10865.9776	4606088.5924
65	12.24	-252.00	-108.32	2230.18	11733.2224	4973702.8324

№	Выборки		Отклонения от среднего		Квадраты отклонений	
	В.1 $P_{(-60)}, \text{Вт/м}^2$	В.2 $P_{(+30)}, \text{Вт/м}^2$	В.1 $P_{(-60)}, \text{Вт/м}^2$	В.2 $P_{(+30)}, \text{Вт/м}^2$	В.1 $P_{(-60)}, \text{Вт/м}^2$	В.2 $P_{(+30)}, \text{Вт/м}^2$
66	12.24	-252.00	-108.32	2230.18	11733.2224	4973702.8324
67	4.08	-84.00	-116.48	2398.18	13567.5904	5751267.3124
68	8.16	-168.00	-112.4	2314.18	12633.76	5355429.0724
69	5.10	-105.00	-115.46	2377.18	13331.0116	5650984.7524
70	5.44	-112.00	-115.12	2370.18	13252.6144	5617753.2324
71	2.38	-49.00	-118.18	2433.18	13966.5124	5920364.9124
72	1.70	-35.00	-118.86	2447.18	14127.6996	5988689.9524
Суммы:	8680.54	-178717	0.22	-0.04	550289.2148	233254078.6528

Таблица В.6 – Показатели выборки в виде изменения генерирующей мощности ФЭП вследствие влияния поверхностного загрязнения пылью после применения способа защиты

№	Выборки		Отклонения от среднего		Квадраты отклонений	
	В.1 $P_{\text{чист}}, \text{Вт/м}^2$	В.2 $P_{\text{отп}}, \text{Вт/м}^2$	В.1 $P_{\text{чист}}, \text{Вт/м}^2$	В.2 $P_{\text{отп}}, \text{Вт/м}^2$	В.1 $P_{\text{чист}}, \text{Вт/м}^2$	В.2 $P_{\text{отп}}, \text{Вт/м}^2$
1	0.000	0.000	-38.84	-3.51	1508.5456	12.3201
2	2.286	0.206	-36.554	-3.304	1336.1949	10.9164
3	5.714	0.515	-33.126	-2.995	1097.3319	8.97
4	6.857	0.618	-31.983	-2.892	1022.9123	8.3637
5	9.143	0.824	-29.697	-2.686	881.9118	7.2146
6	8.686	0.783	-30.154	-2.727	909.2637	7.4365
7	7.314	0.659	-31.526	-2.851	993.8887	8.1282
8	8.114	0.731	-30.726	-2.779	944.0871	7.7228
9	8.229	0.741	-30.611	-2.769	937.0333	7.6674
10	8.571	0.772	-30.269	-2.738	916.2124	7.4966
11	15.086	1.359	-23.754	-2.151	564.2525	4.6268
12	21.371	1.926	-17.469	-1.584	305.166	2.5091
13	29.943	2.698	-8.897	-0.812	79.1566	0.6593
14	36.686	3.305	-2.154	-0.205	4.6397	0.042
15	38.171	3.439	-0.669	-0.071	0.4476	0.005
16	40.766	3.673	1.926	0.163	3.7095	0.0266
17	47.086	4.242	8.246	0.732	67.9965	0.5358
18	48.000	4.325	9.16	0.815	83.9056	0.6642
19	46.629	4.201	7.789	0.691	60.6685	0.4775
20	51.429	4.634	12.589	1.124	158.4829	1.2634
21	54.057	4.871	15.217	1.361	231.5571	1.8523
22	57.029	5.138	18.189	1.628	330.8397	2.6504
23	61.714	5.560	22.874	2.05	523.2199	4.2025
24	70.857	6.384	32.017	2.874	1025.0883	8.2599
25	75.429	6.796	36.589	3.286	1338.7549	10.7978
26	59.429	5.355	20.589	1.845	423.9069	3.404
27	82.286	7.414	43.446	3.904	1887.5549	15.2412
28	74.286	6.693	35.446	3.183	1256.4189	10.1315
29	73.143	6.590	34.303	3.08	1176.6958	9.4864
30	71.429	6.436	32.589	2.926	1062.0429	8.5615
31	73.143	6.590	34.303	3.08	1176.6958	9.4864

№	Выборки		Отклонения от среднего		Квадраты отклонений	
	В.1 Р _{чист} , Вт/м ²	В.2 Р _{отп} , Вт/м ²	В.1 Р _{чист} , Вт/м ²	В.2 Р _{отп} , Вт/м ²	В.1 Р _{чист} , Вт/м ²	В.2 Р _{отп} , Вт/м ²
32	75.086	6.765	36.246	3.255	1313.7725	10.595
33	74.514	6.714	35.674	3.204	1272.6343	10.2656
34	73.143	6.590	34.303	3.08	1176.6958	9.4864
35	72.000	6.487	33.16	2.977	1099.5856	8.8625
36	70.857	6.384	32.017	2.874	1025.0883	8.2599
37	76.229	6.868	37.389	3.358	1397.9373	11.2762
38	74.743	6.734	35.903	3.224	1289.0254	10.3942
39	76.286	6.590	37.446	3.08	1402.2029	9.4864
40	71.040	6.401	32.2	2.891	1036.84	8.3579
41	67.086	6.044	28.246	2.534	797.8365	6.4212
42	76.571	6.384	37.731	2.874	1423.6284	8.2599
43	64.571	5.818	25.731	2.308	662.0844	5.3269
44	60.343	5.437	21.503	1.927	462.379	3.7133
45	62.057	5.766	23.217	2.256	539.0291	5.0895
46	50.971	5.663	12.131	2.153	147.1612	4.6354
47	59.886	5.396	21.046	1.886	442.9341	3.557
48	52.686	4.747	13.846	1.237	191.7117	1.5302
49	49.714	4.479	10.874	0.969	118.2439	0.939
50	46.629	4.201	7.789	0.691	60.6685	0.4775
51	46.629	4.201	7.789	0.691	60.6685	0.4775
52	45.143	4.067	6.303	0.557	39.7278	0.3102
53	43.543	3.923	4.703	0.413	22.1182	0.1706
54	39.086	3.522	0.246	0.012	0.0605	0.0001
55	34.743	3.130	-4.097	-0.38	16.7854	0.1444
56	30.286	2.729	-8.554	-0.781	73.1709	0.61
57	25.943	2.337	-12.897	-1.173	166.3326	1.3759
58	23.086	2.080	-15.754	-1.43	248.1885	2.0449
59	18.629	1.678	-20.211	-1.832	408.4845	3.3562
60	17.143	1.545	-21.697	-1.965	470.7598	3.8612
61	7.086	0.638	-31.754	-2.872	1008.3165	8.2484
62	11.429	1.030	-27.411	-2.48	751.3629	6.1504
63	1.371	0.124	-37.469	-3.386	1403.926	11.465
64	2.286	0.206	-36.554	-3.304	1336.1949	10.9164
65	1.714	0.154	-37.126	-3.356	1378.3399	11.2627
66	1.143	0.103	-37.697	-3.407	1421.0638	11.6076
67	0.000	0.000	-38.84	-3.51	1508.5456	12.3201
68	0.000	0.000	-38.84	-3.51	1508.5456	12.3201
69	0.000	0.000	-38.84	-3.51	1508.5456	12.3201
70	0.000	0.000	-38.84	-3.51	1508.5456	12.3201
71	0.000	0.000	-38.84	-3.51	1508.5456	12.3201
72	0.000	0.000	-38.84	-3.51	1508.5456	12.3201
Суммы:	2796.555	252.413	0.075	-0.307	56024.8154	453.976