

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Институт энергетики

Высшая школа высоковольтной энергетики

Бобков Василий Александрович

**Методика оптимизации параметров сетевых фотоэлектрических станций с
учётом климатической изменчивости**

Направление подготовки: 14.06.01 «Ядерная, тепловая и возобновляемая энергетика и
сопутствующие технологии»

Код и наименование

Направленность: 14.06.01_02 (05.14.08) «Энергоустановки на основе возобновляемых
видов энергии»

Код и наименование

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Санкт Петербург – 2021

Научно-квалификационная работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург.

Научный руководитель: Елистратов Виктор Васильевич

Доктор технических наук, профессор, профессор высшей школы «гидротехническое и энергетическое строительство» СПбПУ Петра Великого.

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Введение

Актуальность диссертационной работы обусловлена необходимостью разработки и проектирования современных фотоэлектрических установок с высоким показателем энергоэффективности.

Целью диссертационной работы является разработка методики оптимизации параметров сетевых солнечных электростанций с учётом климатических особенностей.

Задачи, которые были решены для достижения поставленной цели:

1. Проанализированы современные технологии систем генерации электроэнергии на основе фотоэлементов (ФЭ).
2. Проведён анализ природно-климатических факторов и их влияния на параметры и режимы работы солнечных фотоэлектрических станций (СФЭС).
3. Разработан алгоритм и программный комплекс для оптимизации параметров и моделирования режимов работы с учётом природно-климатических особенностей рассматриваемого региона
4. Проведены практические расчёты по оптимизации параметров СФЭС, а также моделирование режимов работы СФЭС на примере станции мощностью 10 МВт с расположением в Ставропольском крае.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана методика оптимизации параметров СФЭС по критерию максимизации выработки в условиях климатической изменчивости с рассмотрением различных вариантов фотоэлектрических модулей (ФЭМ);
2. Разработана математическая модель работы фотоэлектрического элемента с учётом климатических особенностей (интенсивность, температура, облачность, скорость ветра, прозрачность атмосферы).
3. Разработан алгоритм моделирования режимов работы СФЭС с учётом климатических факторов и вариативности используемых ФЭМ.
4. Разработана программа выбора и оптимизации параметров СФЭС с использованием языка программирования Java.

Достоверность результатов исследований и методических обоснований подтверждается сравнительным анализом полученных результатов с данными тестового моделирования. В результате проведённых исследований использованием апробированных методик и сравнением известных данных, PVSYST:

Результаты работы:

1. Разработаны новые модели и методики оптимизации параметров и режимов работы СФЭС, в частности алгоритм выбора модели ФЭМ, алгоритм выбора инверторного оборудования с обеспечением максимизации выработки электроэнергии.
2. Создана программа ЭВМ, реализующая предложенную модель и методику оптимизации параметров СФЭС, на основе которой проведено моделирование режимов работы СФЭС и выбраны оптимальные параметры и конфигурация оборудования СФЭС.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Методика оптимизации угла установки фотоэлектрического модуля изменчивости природно-климатических характеристик.

2. Алгоритм моделирования режимов работы СФЭС с учётом вариативности.

Область применения результатов исследования

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании СФЭС в различных климатических районах и повышения эффективности их работы.

Апробация и внедрение результатов

По результатам работы опубликовано 5 научных работ. В том числе 1 в издании ВАК.

Структура и объем научного доклада

Структура научного доклада состоит из введения, основной части, заключения, списка литературы. Объем научного доклада составляет 50 страниц текста, 26 рисунков, 5 таблиц и список используемых источников, включающий 31 наименований.

Краткое содержание работы

В первой главе рассмотрено текущее состояние фотоэлектрической работы, поставлены задачи исследования.

В настоящее время большую часть энергии в мире производят электростанции на основе невозобновляемых источников энергии. Традиционная энергетика формировалась в условиях постоянного роста потребности в электроэнергии на протяжении последних двух столетий. Ускоряющееся потребление невозобновляемых источников энергии приводит к их быстрому истощению и может стать причиной энергетического кризиса в будущем [1].

Кроме истощения невозобновляемых источников энергии традиционная энергетика создаёт дополнительные риски для энергетической безопасности. Как правило, источники органического топлива для электростанций расположены в отдалении от самих электростанций. Перебои с поставками топлива на электростанцию могут привести к проблемам энергоснабжения населения и существенно повлиять на экономическую жизнь территории, которую обслуживает эта электростанция. Особенно острой данная проблема является для обособленных энергосистем [2].

Помимо проблем с поставками топлива, важной проблемой в современном мире являются выбросы загрязняющих веществ в атмосферу, значительный вклад в которые составляют электростанции на основе невозобновляемых источников энергии. Последние сто лет наблюдается глобальное потепление, вызванное антропогенным влиянием человека. По наблюдениям научного сообщества частота событий экстремально жаркой погоды по сравнению с десятилетиями до 1980 года увеличилась в несколько десятков раз. За последние сорок лет доля земного шара, в котором наблюдается чрезвычайная летняя жара выросла с 0,1 — 0,2 % до 10 %, прогнозируется дальнейший рост [3]. Вместе с тем энергетический сектор оказывает значительное влияние на рост количества выбросов углекислого газа в атмосферу (рис. 1).

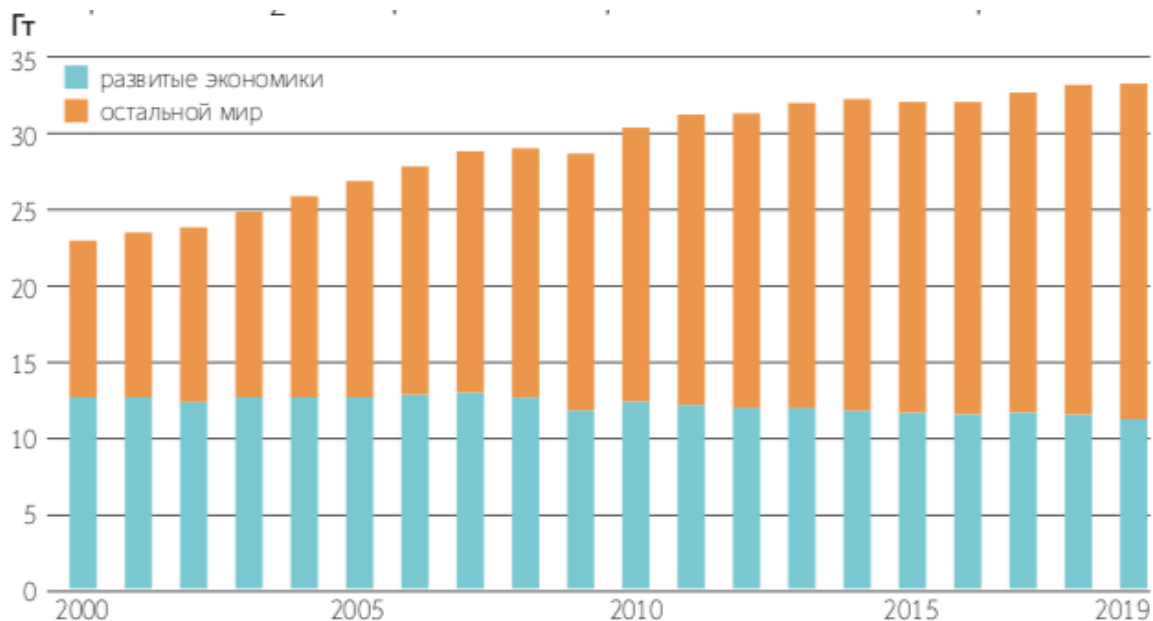


Рис. 1. Количество выбросов углекислого газа в атмосферу, производимых энергетическим сектором экономики.

Основным решением обозначенных проблем является развитие энергетики на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ). В состав ВИЭ входят лучистая энергия солнца, гидроэнергия, энергия ветра, геотермальная и приливная энергия. Возобновляемые источники энергии бесплатны и условно бесконечны. Электростанции на основе ВИЭ находятся непосредственно рядом с источником энергии и таким образом решается проблема транспортировки источника энергии и рисков, связанных с ней. Электростанции на основе ВИЭ не производят выбросы загрязняющих веществ в атмосферу, значительно снижая воздействие на климат планеты [4]. Использование солнечной энергии для производства электроэнергии в настоящее время занимает одно из ведущих мест среди других видов ВИЭ. По темпам роста установленной мощности солнечная энергетика является лидером среди остальных видов возобновляемой энергетики.

Рост мирового уровня потребления энергии требует роста генерации энергии в условиях уменьшения ископаемых запасов топлив. Крупные электростанции в существующей системе электроснабжения вырабатывают большую часть электроэнергии на основе ископаемого топлива. Для сокращения выбросов углекислого газа и повышения энергетической эффективности правительства многих стран считают одним из приоритетных направлений решения обозначенной проблемы развитие отрасли энергетики на основе возобновляемых источников энергии.

В настоящее время основным направлением развития мировой энергетики является переход к широкому использованию возобновляемых источников энергии и вытеснению ископаемого топлива под влиянием изменений энергетической политики и развития новых технологий для достижения целей по декарбонизации и повышения энергетической безопасности [5].

Меры поддержки, предпринятые правительствами разных стран, позволили увеличить долю установленной общей мощности объектов энергетики на основе ВИЭ [6] до 2588 ГВт к

2020 году, из которых гидроэнергетика составляет более 1307 ГВт, ветроэнергетика - 651 ГВт, солнечная энергетика - 586 ГВт, геотермальная энергетика - 14 ГВт (рис. 2).

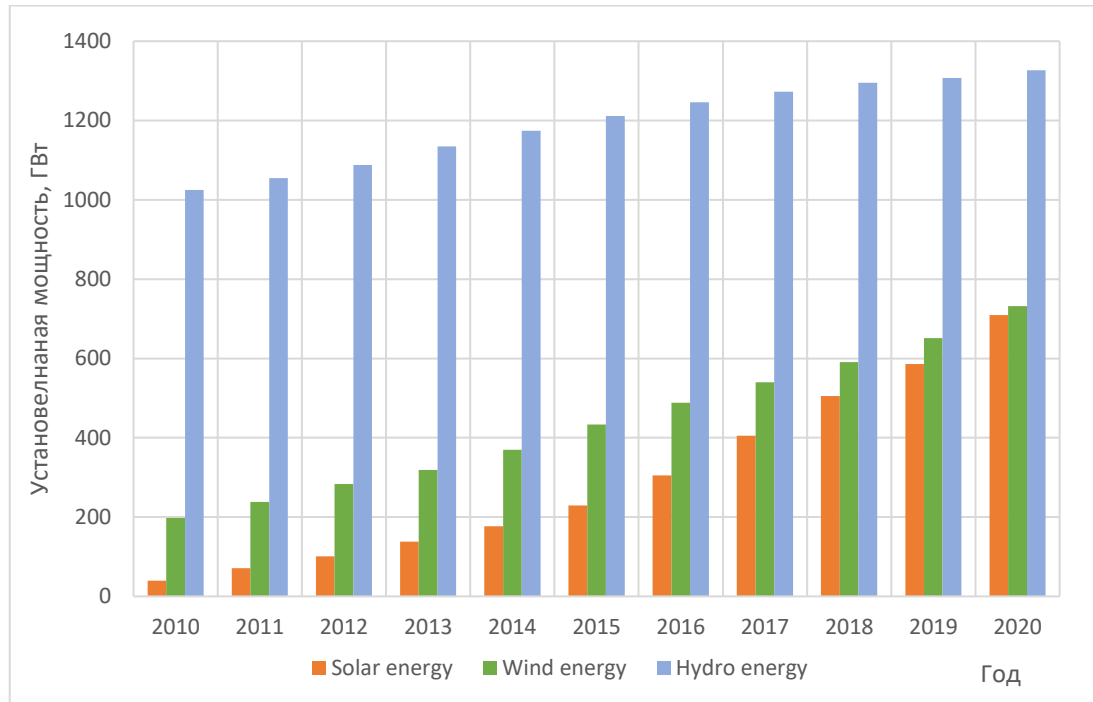


Рис. 2. Динамика роста установленной мощности установок на основе ВИЭ.

Важным и перспективным направлением развития ВИЭ является солнечная фотоэнергетика. Прирост установленной мощности солнечных фотоэлектрических станций в 2019 году составил 97 ГВт, тем самым превысив совокупный прирост мощности ветровой и гидроэнергетики. Производство электроэнергии на СФЭС увеличилось на 28,9% - с 582,8 ТВт·ч в 2018 году до 724 ТВт·ч в 2019 году. Год к году расчёт номинальная мощность мировых СФЭС.

В таблице 1 представлены крупнейшие СФЭС в мире с информацией об основных параметрах.

Таблица 1. Крупнейшие СФЭС в мире.

Регион	Название и характеристики СФЭС
США	<ul style="list-style-type: none"> Solar Star (Калифорния), мощность 579 МВт, площадь 13 км², состоит из 1,7 млн. одноосевых следящих фотоэлектрических модулей Topaz Solar Farm (Сан-Луис-Обиспо), мощность 550 МВт, площадь 25 км², состоит из 9 млн. тонкопленочных фотоэлектрических модулей из теллурида кадмия CdTe, СФЭС сокращает выбросы CO₂ на 380 тысяч тонн в год.
Европа	<ul style="list-style-type: none"> Cestas (Франция), мощность 300 МВт, площадь 2,6 км² и состоит из 983, 5 тыс. солнечных модулей (рис. 3). Solarpark Meuro (Германия), мощность 166 МВт. Построена на участке бывшего угольного карьера. Montalto di Castro PV Power Plant, (Италия), мощность 84,2 МВт

Регион	Название и характеристики СФЭС
Китай	Longyangxia Dam, мощность 320 МВт, работает в составе энергокомплекса с ГЭС.
Индия	Charanka Solar Park, мощность 214 МВт
Канада	Sarnia Photovoltaic Power Plant (штат Мичиган), мощность 97 МВт, площадь 3,80 кв. км, 1,3 млн. модулей
Япония	Kagoshima Nanatsujima Mega Solar Power Plant мощность 70 МВт, располагается на искусственной дамбе в Восточно-Китайском море, площадь 1,27 км ² , расположено 290 тыс. солнечных модулей



Рис. 3. Вид на СФЭС Cestas.

Комплекс мер поддержки развития возобновляемой энергетики вызвал рост мощности СФЭС в России за последние 5 лет. Суммарная установленная мощность СФЭС в единой энергосистеме России на начало 2020 года составила 1362,72 МВт [7]. Наиболее крупной станцией, введенной в эксплуатацию в 2020 году, является Старомарьевская СФЭС мощностью 100 МВт. Большинство существующих и строящихся станций имеют установленную мощность более 40 МВт (таблица 2), внешний вид СФЭС представлен на примере старомарьевской станции рис. 4.

Таблица 2. Крупнейшие СФЭС России.

Название	Местоположение	Установленная мощность	Объем инвестиций, млрд.руб	Количество солнечных модулей	Площадь, Га	Угол наклона, град
СФЭС Перово	Республика Крым.	105,56 МВт.	15,767	440 000.	200	45
Старомарьевская СФЭС	Ставропольский край	100 МВт	14	349 000	50	45
СФЭС Охотниково	Республика Крым	82,6 МВт	12,270	360 000	160	45
Фунтовская СФЭС	Астраханская область.	75 МВт	8,5	214 644.	146	46
Самарская СФЭС	Самарская область	75 МВт	8	265 690	220	53

Название	Местоположение	Установленная мощность	Объем инвестиций, млрд.руб	Количество солнечных модулей	Площадь, Га	Угол наклона, град
СФЭС Николаевка	Республика Крым.	69,7 МВт		290 048	116	53
Сорочинская СФЭС	Оренбургская область	60 МВт	5,7	200 000	120	52
Ахтубинская СФЭС	Астраханская область	60 МВт			200	56
Новосергиевская СФЭС	Оренбургская область	45 МВт	4,3	свыше 150 000	92	46
Орская СЭС им Влазнева	Оренбургская область	40 МВт	3	160 110	100	51



Рис. 4. Старомарьевская СФЭС.

Использование традиционных источников энергии создаёт экологические проблемы. Это в совокупности с отделением производства от потребления энергии, а также наличием различных программ поддержки развития, определяют возрастающий спрос и обеспечивают рост объёмов производства. Большинство развитых стран активно поддерживает стремительный рост солнечной энергетики.

Последовательное снижение цены солнечной энергии имеет решающее значение. Постоянные исследования и инновации будут поддерживать тренд снижения стоимости энергии до уровня, сравнимого с централизованными сетями.

В России на законодательном уровне начиная с 2009 года осуществляется поддержка развития электрогенерации на основе ВИЭ. В развитие Федерального Закона № 35-ФЗ «Об

электроэнергетике» принят ряд нормативно-правовых актов, одним из которых является Распоряжение Правительства РФ от 08.01.2009 N 1-р «Об основных направлениях государственной политики в сфере повышения энергетической эффективности электроэнергетики на основе использования возобновляемых источников энергии на период до 2024 года». В данном документе определены этапы развития энергетики на ВИЭ в долгосрочной перспективе и установлены целевые показатели развития энергетики на ВИЭ в процентах от совокупного объема производства электроэнергии в России: к 2020 году – 4,5%. На 2017 год установленная мощность СЭС в России составляет 500 МВт [8].

В России функционируют механизмы поддержки объектов генерации ВИЭ, различающиеся на оптовом и розничном рынке электроэнергии и мощности. На оптовом рынке законодательно поддерживаются только солнечные и ветровые электростанции с установленной мощностью не менее 5 МВт, а также малые гидроэлектростанции мощностью от 5 до 25 МВт [9].

Основным механизмом поддержки объектов ВИЭ при технологическом присоединении генерирующих объектов к электрическим сетям является выплата субсидии из федерального бюджета [10].

Создание отрасли возобновляемой энергетики в России происходило в несколько этапов:

- 1) формирование законодательной базы поддержки возобновляемой энергетики (2007 г);
- 2) разработка подзаконной нормативно-правовой базы поддержки возобновляемой энергетики (2008-2015 гг.);
- 3) проведение конкурсных отборов мощностей по различным видам генерации и запуск в эксплуатацию электростанций на основе ВИЭ (с 2015 г.).

Для достижения поставленной цели в систему подзаконной нормативной базы поддержки ВИЭ было включено обязательное требование по степени локализации оборудования. Таким образом, для участия в тендере компании должны выполнить обязательное требование по минимально необходимой степени локализации основного и вспомогательного оборудования.

Мощность объектов генерации на основе ВИЭ реализуется в виде договоров на поставку мощностей (ДПМ). Механизм ДПМ основан на принципах конкуренции: общий объем мощности определяется директивно, а в результате конкурса побеждает тот, кто смог предложить минимальную цену за требуемый объем мощности.

Отрасль возобновляемой энергетики России демонстрирует развитие, несмотря на обеспеченность традиционными источниками энергии. Система государственной поддержки энергетики на основе ВИЭ содержит механизмы для организации оптового и розничного рынка электроэнергии, а также для микрогенерации. Система поддержки на оптовом рынке электроэнергии является наиболее эффективной и успешно функционирующей на данный момент. Механизм государственной поддержки на оптовом рынке способствует не только строительству объектов ВИЭ, но и локализации производства оборудования для станций на основе ВИЭ.

Энергия потока солнечного излучения может быть преобразована в электрическую с помощью полупроводниковых фотоэлектрических элементов. По оценкам исследователей, КПД производимых в промышленных масштабах фотоэлементов в среднем составляет 16%, а у лучших образцов достигает 25% [11].

Выделяют три поколения ФЭМ, в зависимости от материала, конструкции и технологии производства [12]:

- ФЭМ первого поколения на основе кристаллического кремния;
- ФЭМ второго поколения на основе тонкоплёночной технологии;
- ФЭМ третьего поколения на основе органических и неорганических соединений.

Наибольший успех на коммерческом рынке имеют ФЭМ первого поколения на основе кристаллического кремния. Себестоимость производства таких ФЭМ значительно снизилась в последние годы.

Виды ФЭМ первого поколения:

- монокристаллический кремний;
- поликристаллический кремний;
- тонкослойный кремний.

Технология выпуска тонкопленочных ФЭМ второго поколения основываются на нанесении слоев вакуумным методом. Данная технология является менее энергозатратной, а также характеризуется меньшим объемом капитальных вложений. Она позволяет выпускать гибкие дешевые ФЭМ большой площади, однако коэффициент полезного действия таких элементов ниже по сравнению с ФЭМ первого поколения [13].

Виды ФЭМ второго поколения:

- аморфный кремний;
- микро- и нанокремний;
- теллурид кадмия;

Основными направлениями дальнейшего развития технологий ФЭМ являлось снижение себестоимости и улучшение экологичности. В ходе это развития было выделено третье поколение ФЭМ, важным отличием которого является уход от использования токсичных материалов к более экологичным. На текущий момент основная часть технологий в области ФЭМ третьего поколения находится в стадии исследования [14].

Виды ФЭМ третьего поколения:

- сенсibilизированные красителем;
- органические;
- неорганические.

Таблица 3. Значения эффективности солнечных элементов и модулей, достигнутые в лабораторных условиях.

Тип и состав солнечного элемента	Коэффициент полезного действия, %
----------------------------------	-----------------------------------

Кремниевые	16,6-24,7
Элементы на основе соединения элементов III и V группы	18,2-25,1
Тонкослойные солнечные батареи	16,5-19,9
Солнечные батареи на основе аморфного или нанокристаллического кремния	9,5-10,1
Фотохимические солнечные батареи на основе органических красителей	10,4
Органические солнечные батареи на основе органических полимеров	5,15

Проанализированы технологии фотоэлектрических преобразователей, используемых в современных СФЭС. Существующие технологии выдели в три поколения. Коммерчески успешным на данный момент является первое поколение, включающее ФЭМ на основе кристаллического кремния. Эффективность промышленных образцов ФЭМ в среднем составляет 17%. В условиях относительно низкого КПД коммерческих технологий ФЭ и высокой стоимости единицы мощности фотоэлектрической станции, важную роль играет оптимизация параметров и режимов работы станции. Необходимость использования локализованного оборудования в рамках строительства СФЭС, с заключением договоров на поставку мощности, ограничивает набор фотоэлектрических модулей, которые могут быть использованы [15].

В первой главе дан обзор текущего состояния развития солнечной фотоэнергетики. На протяжении 2015–2020 годов наблюдался ежегодный рост мировой установленной мощности на 20% ежегодно. Прирост установленной мощности солнечных фотоэлектрических станций в 2019 году составил 97 ГВт. Производство электроэнергии на СФЭС увеличилось на 28,9% - с 582,8 ТВт·ч в 2018 году до 724 ТВт·ч в 2019 году. Наиболее крупные СФЭС имеют мощность более 1 ГВт. В значительной мере данный рост обусловлен снижением стоимости фотоэлектрических модулей, а также поддержкой отрасли со стороны правительств большинства стран. В России подготовлена законодательная база, обеспечившая значительный рост количества сетевых СФЭС начиная с 2015 года. Основным механизмом поддержки развития фотоэнергетики в России является работа в рамках договора о предоставленной мощности. Программа рассчитана до 2024 года и ставит своей целью увеличение общей установленной мощности СФЭС до 240 МВт.

На основе анализа современного состояния развития солнечной фотоэнергетики и технологии используемых фотоэлектрических модулей сформулированы следующие задачи исследования:

1. Провести анализ современные технологии систем генерации электроэнергии на основе фотоэлементов и предложить наиболее эффективные.
2. Провести анализ природно-климатических факторов и их влияния на параметры и режимы работы СФЭС.
3. Разработать математическую модель работы фотоэлектрического элемента с учётом климатической особенностей (интенсивность, температура, облачность, скорость ветра, прозрачность атмосферы).
4. Разработать алгоритм и программный комплекс для оптимизации параметров и режимов работы с учётом природно-климатических особенностей рассматриваемого региона.

5. Провести практические расчёты по оптимизации параметров СФЭС, а также провести моделирование режимов работы СФЭС на примере станции мощностью 10 МВт с расположением в Ставропольском крае.

Во второй главе рассмотрена оценка поступления солнечного излучения на поверхность ФЭМ.

В распределении спектра солнечного излучения 99% всей энергии приходится на интервал длин волн между 0,1 и 4 мкм [16]. Методы измерения солнечного спектра с использованием космических спутников позволяют точно определять распределение энергии в спектре солнечной радиации на околоземной орбите до поступления её в атмосферу земли.

Солнечная радиация, поступающая на поверхность земли состоит из трёх основных компонентов. Прямая солнечная радиация, не рассеянная атмосферой, поступает непосредственно от Солнца. На верхнюю границу атмосферы поступает только прямая радиация. Далее часть солнечного излучения отражается обратно в космос, а другая часть проходит через атмосферу, которая частично поглощает излучение.

Проходя через атмосферу часть излучения рассеивается и падает на поверхность земли в виде рассеянного излучения. Рассеяние излучения происходит во всем диапазоне длин волн электромагнитного спектра. Основное влияние на степень рассеивания оказывает отношение размера рассеивающих частиц к длине волны падающего излучения.

Около двух третей рассеянной радиации поступает на земную поверхность. Мощным поглотителем солнечной радиации является озон. Он поглощает ультрафиолетовую и видимую солнечную радиацию. Несмотря на низкое содержание этого газа в воздухе, он сильно в значительной мере поглощает ультрафиолетовую радиацию в верхних слоях атмосферы. Таким образом часть спектра солнечного излучения, у которого длина волны короче 0,29 мкм вообще не наблюдаются у земной поверхности. Все ослабление радиации путем поглощения и рассеяния определяется двумя факторами:

- 1) ослабление постоянными газами;
- 2) ослабление водяным паром и аэрозольными примесями.

Летом значительную роль в ослаблении и играет запыление и увеличенное содержание водяного пара в атмосфере [17].

Величина отражения солнечной радиации земной поверхностью зависит от характера этой поверхности и как правило варьируется в зависимости от времени года. Отношение количества отраженной радиации к общему количеству радиации, падающей на данную поверхность, называется альбедо поверхности.

Суммарная радиация включает в себя прямую и рассеянную. Облачность уменьшает суммарную радиацию. Поэтому летом величина суммарной радиации в первой половине дня в среднем больше, чем во второй половине дня.

Исследованием прямой, рассеянной и отраженной радиации, длинноволновой радиации, падающей на земную поверхность и проходящей через атмосферу занимается актинометрия. В СССР были разработаны многотомные справочники по климату, которыми активно пользовались специалисты-гелиотехники. В настоящее время в России существует развитая сеть метеорологических станций, при этом количество станций ведущих актинометрические измерения ограничено. Относительно низкая плотность размещения

действующих в России актинометрических станций обуславливает сложность получения надежных данных о солнечной радиации и её распределении по территории страны. В настоящее время актинометрическая сеть России состоит из 186 станций, которые обеспечивают получение информации об основных параметрах солнечного излучения. Кроме климатических справочников, существуют массивы накопленных данных, агрегированных в Мировом центре радиационных данных (World Radiation Data Centre). В настоящее время центр предоставляет информационно-поисковую систему с актуальной базой данных о составляющих солнечного излучения на станциях измерения, входящих в сеть Всемирной метеорологической организации (WMO). Доступ пользователей к информационным ресурсам осуществляется по сети интернет.

В настоящее время наиболее полная природно-климатическая информация о солнечном излучении и его распределении по Земной поверхности, содержится в электронных базах данных. Как правило в процессе создания таких баз, наблюдаемые данные о солнечном излучении времени систематизируют и статически обрабатывают. Такие базы данных можно разделить по следующим факторам:

- источник исходных данных:
 - наблюдения с космических спутников;
 - измерения наземных метеостанций;
 - комбинированные данные на основе спутниковых и наземных наблюдений.
- периоду наблюдений;
- количеству географических точек, для которых доступны данные наблюдений;
- временному интервалу наблюдений. Базы могут содержать данные с интервалом начиная от нескольких минут, а также содержать осредненные дневные и месячные значения сумм солнечного излучения;

Актинометрические станции, измеряющие величину солнечного излучения, распространены по миру крайне неравномерно. Существуют регионы в которых подобного рода измерения не могут быть проведены, ввиду отсутствия метеорологических станций. В таких регионах величина прихода солнечного излучения может быть определена расчетным путем на основе данных о продолжительности светового дня и облачности. Стоит отметить, что большинство станций измеряют только полное солнечное излучение. В районах со сложной топографией получаемые в результате применения расчётных методов данные обладают существенной неточностью.

Второй подход к оценке солнечного излучения базируется на использовании данных спутниковой съемки. Геоостационарные спутники систем Meteosat, GOES, MSAT или MSG используются для оценки объема солнечного излучения на обширных территориях. Развитие технологий спутниковой съемки затрагивает в первую очередь пространственное и временное разрешения получаемой информации.

Третий метод получил самое широкое распространение и основывается на комбинации метеорологических и спутниковых измерений. Спутниковые измерения применяются для районов, в которых невозможно провести метеорологические измерения ввиду отсутствия метеостанций. Наиболее часто используемые базы природно – климатической информации для

расчетов солнечной энергии: Meteonorm , ESRA , Satel-Light , NASA SSE/RETScreen , HelioClim/SoDa , PVGIS, Merra.

Наиболее актуальные данные представлены в базе NASA Merra2, которая также совмещает наземные и спутниковые наблюдения. Помимо данных о солнечной радиации, база содержит множество других данных, которые понадобятся при проектировании электростанции: скорость и направление ветра, температура воздуха.

В качестве источника первичной метеорологической информации в данной работе используются данные из MERRA 2, как наиболее адаптированной к моделированию режимов работы ФЭМ с коротким интервалом.

Данные в MERRA 2 представлены в виде излучения на горизонтальную поверхность. Позиция солнца относительно определенной географической точки определяется двумя параметрами: высотой солнца над горизонтом и азимутом. Также вместо высоты над горизонтом может использоваться зенитный угол (рис. 5)

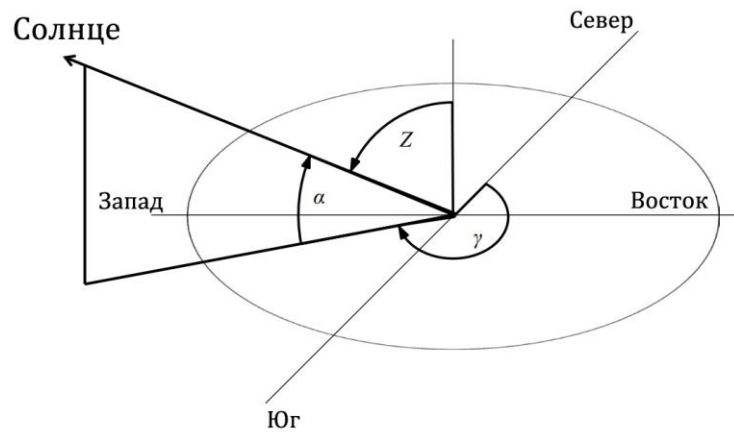


Рис. 5. Система координат Солнца.

Z – зенитный угол, γ – азимут, α – высота солнца над горизонтом.

Исходные данные для расчёта положения солнца:

- временная зона по GMT
- широта
- долгота
- дата и время

В астрономических расчётах принято использовать юлианскую дату.

Юлианская дата (JD) — астрономический способ измерения времени, при котором считается число дней, прошедших начиная с полудня 1 января 4713 до н. э. юлианского календаря или, что тоже самое, 24 ноября 4714 г. до н. э. григорианского календаря [21,22]. Юлианская дата рассчитывается по формуле:

$$JD = 32916,5 + 365(yr - 1949) + \frac{yr - 1949}{4} + jday + \frac{t_{utc}}{24} - 51545, \quad (1)$$

где ug – номер года,

t_{utc} – номер часа по международному координационному времени;

$jday$ – юлианский день, который рассчитывается по формуле:

$$jday = \begin{cases} day + a, & \text{для января и февраля} \\ day + a + k, & \text{для месяцев с марта по декабрь} \end{cases} \quad (2)$$

Номер часа по международному координационному времени:

$$t_{utc} = hr + \frac{min}{60} - tz, \quad (3)$$

где hr – номер часа по местному времени;

tz – смещение времени для рассматриваемого часового пояса.

Первым шагом при расчёте углов, определяющих положение солнца относительно выбранной географической точки и времени, является определение положения земли относительно солнца в эклиптической системе координат.

Позиция земли в эклиптической системе координат определяется следующими параметрами:

- Средняя долгота
- Средняя аномалия
- Долгота эклиптики
- Наклонение эклиптики

Средняя долгота определяется по формуле:

$$mnlorg = 280,46 + 0,9856474 * JD \quad (4)$$

Средняя аномалия:

$$mnanom = \frac{\pi}{180} (357,528 + 0,9856003 * JD) \quad (5)$$

Долгота эклиптики:

$$eclong = \frac{\pi}{180} * [mnlorg + 1,915 * \sin mnanom + 0,02 \sin(2 * mnanom)] \quad (6)$$

Наклонение эклиптики:

$$obleq = \frac{\pi}{180} * (23,439 - 0,0000004JD) \quad (7)$$

$$a = x - 360^\circ$$

Затем вычисляются параметры положения солнца в небесной системе координат – прямое восхождение и склонение. Для экономии пространства в формуле ниже долгота эклиптики обозначается как ecl .

Прямое восхождение:

$$ra = \begin{cases} \arctan \frac{\cos obleq * \sin ecl}{\cos ecl} + \pi, \text{ если } \cos ecl < 0 \\ \arctan \frac{\cos obleq * \sin ecl}{\cos ecl} + 2\pi, \text{ если } \cos ecl * \sin ecl < 0 \end{cases} \quad (8)$$

Угол склонения солнца:

$$\delta = \arcsin (\sin obleq \cdot \sin eclong) \quad (9)$$

На следующем шаге вычисляются местные координаты, для которых требуется часовой угол. Среднее сидерическое время по Гринвичу зависит от текущего времени и юлианской даты [18]:

$$gmst = 6,697375 + 0,0657098242julian + t_{utc} \quad (10)$$

Местное сидерическое время в часах:

$$lmst = gmst + \frac{lon}{15} \quad (11)$$

Часовой угол в радианах ($-\pi < HA < \pi$):

$$b = 15 \frac{\pi}{180} lmst - ra \quad (12)$$

$$HA = \begin{cases} b + 2\pi, \text{ при } b < -\pi \\ b - 2\pi, \text{ при } b > \pi \end{cases} \quad (13)$$

Высота солнца над горизонтом в радианах:

$$H = \begin{cases} G_{on} \cos Z & \text{при } 0 < Z < \frac{\pi}{2} \\ G_{on} & \text{при } Z = 0 \\ 0 & Z < 0 \text{ или } Z > \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (14)$$

$$a = \sin \delta \sin \frac{\pi}{180} lat + \cos \delta \cos \frac{\pi}{180} lat \cos HA \quad (15)$$

$$\alpha_0 = \begin{cases} \arcsin a, & \text{при } -1 \leq a \leq 1 \\ \frac{\pi}{2}, & \text{при } a > 1 \\ \frac{\pi}{2}, & \text{при } a < -1 \end{cases} \quad (16)$$

Высота солнца с учётом рефракции:

$$\alpha_{0d} = \frac{180}{\pi} \alpha_0 \quad (17)$$

$$r = \begin{cases} \alpha_{0d} + 3,51561 \left(\frac{0,1594 + 0,0196\alpha_{0d} + 0,00002\alpha_{0d}^2}{1 + 0,505\alpha_{0d} + 0,0845\alpha_{0d}^2} \right), & \text{при } \alpha_{0d} > -0,56 \\ 0,56, & \text{при } \alpha_{0d} \leq -0,56 \end{cases} \quad (18)$$

$$\alpha = \begin{cases} \frac{\pi}{2}, & \text{при } \alpha_{0d} + r > 90 \\ \frac{\pi}{180} * (\alpha_{0d} + r), & \text{при } \alpha_{0d} + r \leq 90 \end{cases} \quad (19)$$

Азимут солнца для северного полушария:

$$a = \frac{\sin \alpha_0 \sin \left(\frac{\pi}{180} lat \right) - \sin \delta}{\cos \alpha_0 \cos \left(\frac{\pi}{180} lat \right)} \quad (20)$$

$$b = \begin{cases} \arccos a, & \text{при } -1 \leq a \leq 1 \\ \pi, & \text{при } \cos \alpha_0 = 0 \text{ или } a < -1 \\ 0, & \text{при } a > 1 \end{cases} \quad (21)$$

$$\gamma = \begin{cases} b & \text{при } HA < -\pi \\ \pi - b & \text{при } -\pi \leq HA \leq 0 \text{ или } HA \geq \pi \\ \pi + b & \text{при } 0 < HA < \pi \end{cases} \quad (22)$$

Зенитный угол:

$$Z = \frac{\pi}{2} - \alpha \quad (23)$$

Орбитальное излучение:

$$G_{on} = 1367 \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{\pi}{180} * \frac{360doy}{365} \right) \right] \quad (24)$$

Для вычисления угла падения, необходимо определить вспомогательную величину:

$$a = \sin Z \cos(\gamma - \gamma_s) \sin \beta_s + \cos Z \cos \beta_s \quad (25)$$

где Z – зенитный угол солнца;

β_s – угол наклона поверхности;

γ – азимут солнца;

γ_s – азимут поверхности.

Тогда угол падения солнечного излучения

$$AOI = \begin{cases} \pi & \text{при } a < -1 \\ 0 & \text{при } a > 1 \\ \arccos a & \text{при } -1 \leq a \leq 1 \end{cases} \quad (26)$$

При фиксированном положении модуля $\beta_s = \beta_0, \gamma_s = \gamma_0$. Расположение углов показано на рис. 6.

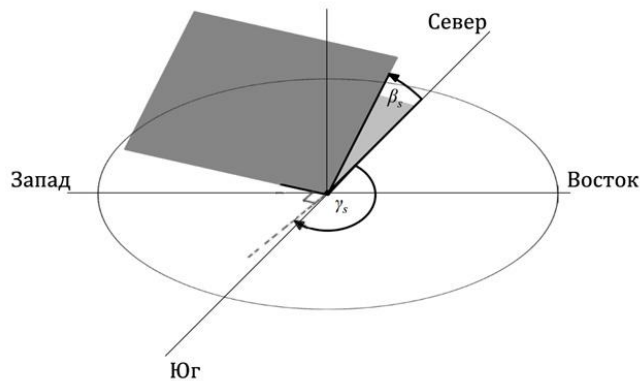


Рис. 6. Схема расположения плоскости ФЭМ в пространстве.

Во второй главе:

- 1) Рассмотрены существующие климатические факторы, влияющие на интенсивность и характер солнечного излучения, поступающего на земную поверхность. Проходя через атмосферу солнечное излучение частично поглощается, отражается и рассеивается, меняя характер распределения спектра длин волн в своём составе.
- 2) Разработана методика оценки солнечного излучения, приходящего на горизонтальную поверхность с использованием наиболее актуальных данных, приведенных в базе Metra 2.
- 3) Проанализированы существующие методики определения положения солнца относительно точки на земной поверхности и расчёта солнечного излучения, поступающего на наклонную поверхность. Для определения положения солнца в рамках данной работы выбрана методика на основе точных астрономических расчётов положения солнца относительно точки на земной поверхности,

учитывающей высоту точки над уровнем моря, а также другие астрономические особенности движения Земли относительно Солнца.

В третьей главе рассматривается оптимизация элементов сетевых фотоэлектрических станций.

Анализ моделей преобразования солнечной энергии в фотоэлектрических модулях

Модели на основе эквивалентных электрических схем наиболее широко используются для моделирования фотоэлементов. Основным преимуществом использования модели электрической цепи является наличие стандартного электрического программного обеспечения, такого как MATLAB, где модель фотоэлемента может быть легко интегрирована в большие фотоэлектрические системы, включающие в себя преобразователь мощности, подключение к сети и т.д. Существуют и другие методы моделирования, которые не используют эквивалентную схему, но они не применяются в современном программном обеспечении для моделирования режимов работы фотоэлектрических элементов.

В основе конструкции фотоэлемента лежат два слоя полупроводникового материала с различным легированием, а р-п-переход находится под воздействием света. Упрощенная структура типичного кремниевого фотоэлемента изображена на рис. 7.

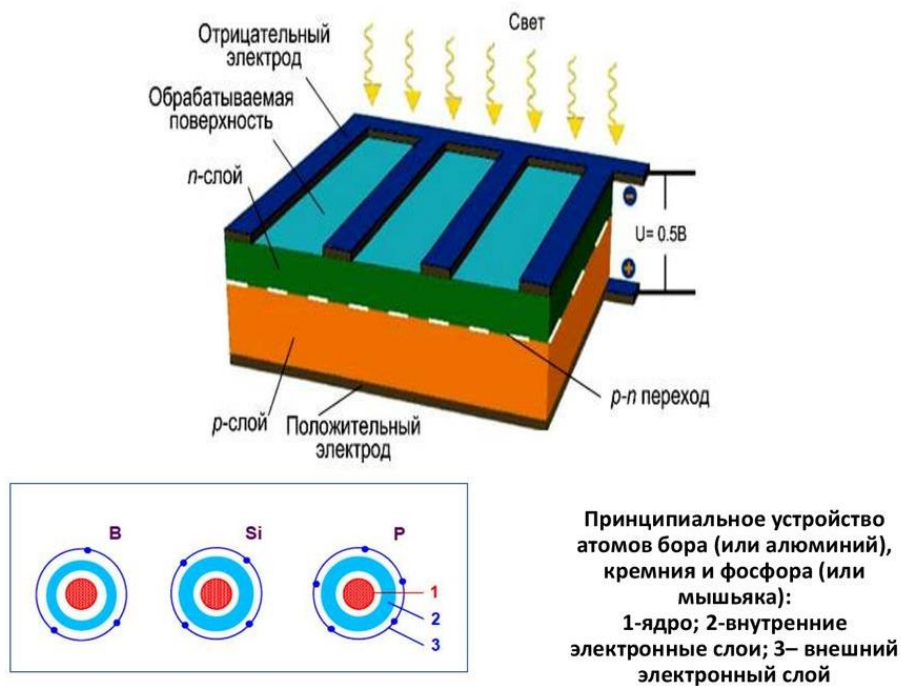


Рис. 7. Структура фотоэлектрического элемента.

С целью уменьшения препятствия падающему излучению, электрод на верхней стороне сделан тонким и прерывистым с пальцеобразными металлическими элементами, встроенными в кремний. Его размер и форма разработаны таким образом, чтобы максимально увеличить поглощающую поверхность и уменьшить контактное сопротивление.

В отсутствие солнечного облучения ячейка ведет себя как простой диод с p-n-переходом. Его характеристики определяются хорошо известным уравнением Шокли, которое выражает ток диода как:

$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{qU}{akT}\right) - 1 \right], \quad (0.1)$$

где I_0 – ток обратного насыщения;

q – заряд электрона, равный $-1,6021766208 \cdot 10^{-19}$ Кл;

a – безразмерный коэффициент качества диода;

k – постоянная Больцмана;

T – температура диода.

При наличии облучения p-n-переход поглощает фотон из падающего света и генерирует электронно-дырочные пары (или носители). Это приводит к возникновению разности потенциалов на переходе, и носители заряда начинают протекать через внешнюю цепь, образуя тем самым фотоэлектрический эффект с протеканием фототока по цепи. Величина фототока $I_{\text{фт}}$ зависит от интенсивности падающего излучения, а также от поглощения полупроводникового материала. Включение $I_{\text{фт}}$ в уравнение Шокли для идеального диода формирует элементарное описание освещенного элемента, состоящего из источника тока, подключенного параллельно диоду с p-n-переходом:

$$I = I_{\text{фт}} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qU}{akT}\right) - 1 \right] \quad (0.2)$$

Как видно из (0.2), модель требует наличие значений трех параметров, а именно фототока $I_{\text{фт}}$, обратного тока насыщения I_0 и коэффициента идеальности a для полноты вольтамперной характеристики. Электрическая схема замещения показана на (0.3)рис. 8.

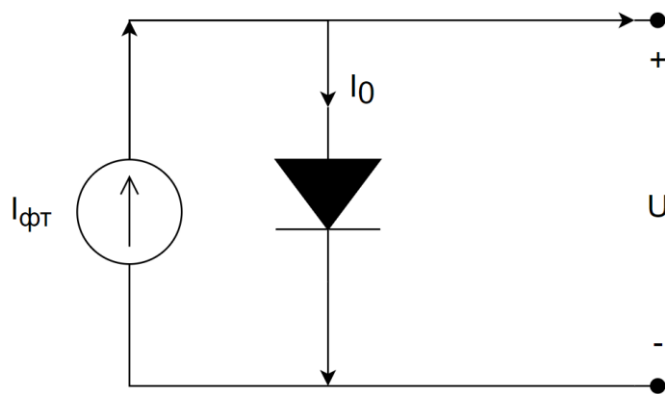


Рис. 8. Схема идеального полупроводникового.

$I_{\text{фт}}$ определяет вертикальную трансляцию кривой, в то время как I_D определяет ее форму экспоненты.

Модель идеального одиночного диода редко используется в качестве рабочей модели для PV-симулятора - она применяется только для объяснения теоретической концепции моделирования ячеек. Чтобы быть реалистичным, необходимо учитывать потери из-за контактного сопротивления между поверхностями кремния и электродов, сопротивление растеканию тока в материале кремния и сопротивление электродов. Одним из способов представления этих потерь является включение последовательного сопротивления ($R_{\text{п}}$) в идеальную модель. Эта модель известна как $R_{\text{п}}$ -модель одиночного диода и изображена на рис. 9.

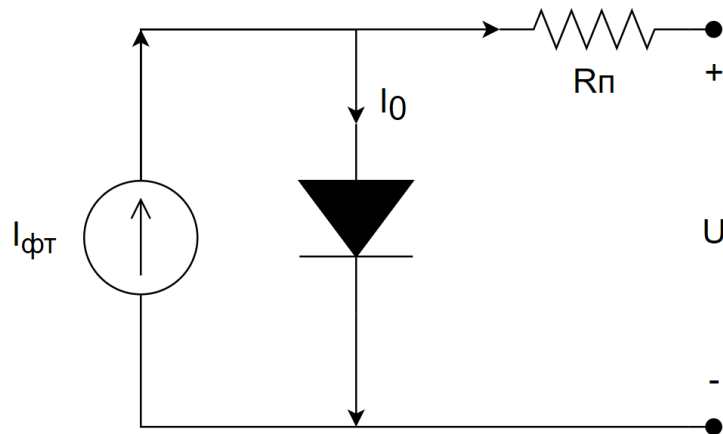


Рис. 9. Модель диода с учётом последовательного сопротивления

Модель требует определения значений четырех параметров, т.е. $I_{\text{фг}}$, I_0 , a и $R_{\text{п}}$. Взаимосвязь между этими параметрами может быть выражена как

$$I = I_{\text{фг}} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(U + IR_{\text{п}})}{akT}\right) - 1 \right] \quad (0.3)$$

Несмотря на свою простоту, точность $R_{\text{п}}$ -модели снижается, если ячейка испытывает значительные колебания температуры. Это объясняется тем, что модель не учитывает роль напряжения холостого хода $U_{\text{хх}}$ и температурного коэффициента K_v . Температурная чувствительность улучшается при включении сопротивления шунта $R_{\text{ш}}$, как показано на рис. 5.

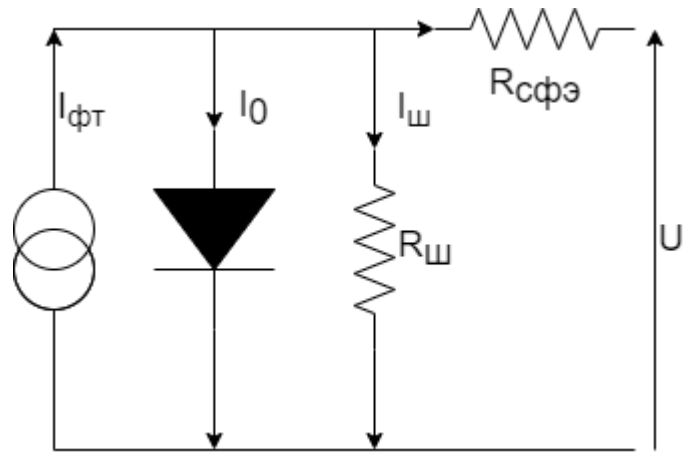


Рис. 10. Однодиодная схема с учётом сопротивления шунтирующего диода ($R_{ш}$ -модель)

В литературе она известна как $R_{ш}$ -модель одиночного диода. Кроме того, наличие $R_{ш}$ соответствует току утечки в р-п-переходе. Его величина варьируется в зависимости от различных методов изготовления. С учетом этого дополнительного компонента значение выходного тока определяется следующим выражением:

$$I = I_{фТ} - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(U + IR_{п})}{akT}\right) - 1 \right] - \frac{U + IR_{п}}{R_{ш}} \quad (0.4)$$

Добавление $R_{ш}$ увеличило количество параметров модели до пяти, а именно $I_{фТ}$, I_0 , a , $R_{п}$ и $R_{ш}$. Несмотря на улучшение характеристик, точность ухудшается при низких значениях облученности, особенно вблизи $U_{хх}$. Тем не менее, благодаря хорошему компромиссу между простотой и точностью, $R_{ш}$ -модель является наиболее популярной. Пример типичной ВАХ, построенной с использованием этой модели, показан на рис. 11.



Рис. 11. Типичная вольтамперная характеристика построенная на основе однодиодной модели, учитывающей сопротивление шунта.

Рассмотренные модели одиночных диодов по своей природе пренебрегают эффектом потери рекомбинационного тока в области обеднения. Учет этих потерь, особенно при низком напряжении, приводит к более точному решению, известному как двухдиодная модель. Модель показана на рис. 12.

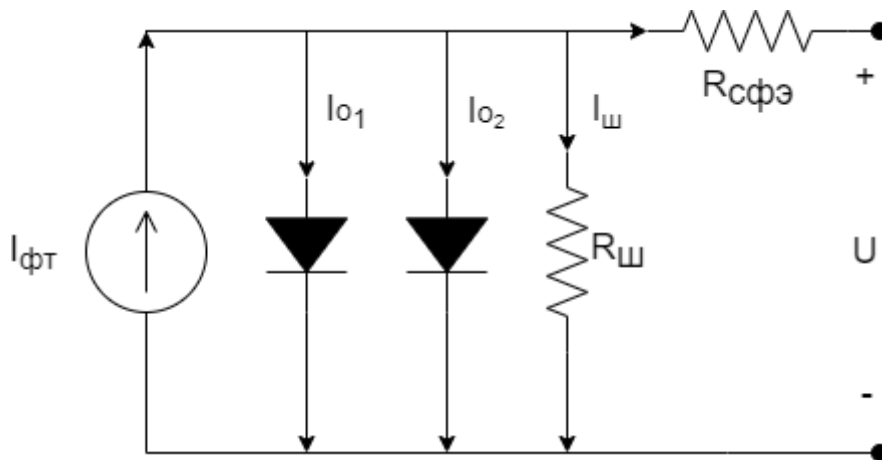


Рис. 12. Двухдиодная модель ФЭМ.

Выражение зависимости тока от напряжения дается следующим образом

$$I = I_{\text{фг}} - I_{01} \left[\exp \left(\frac{q(U + IR_{\text{ш}})}{a_1 kT} \right) - 1 \right] - I_{02} \left[\exp \left(\frac{q(U + IR_{\text{ш}})}{a_2 kT} \right) - 1 \right] - \frac{U + IR_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}}} \quad (0.5)$$

Необходимо учитывать два новых параметра – обратный ток насыщения I_{02} и коэффициент идеальности для второго диода a_2 . Это в дополнение к существующим пяти параметрам, а именно $I_{фТ}$, I_{01} , a_1 , $R_{п}$, $R_{ш}$ - таким образом, количество параметров увеличивается до семи. Кроме того, наличие двух экспоненциальных членов представляет значительную проблему для поддержания разумного времени моделирования. Тем не менее, двухдиодная модель остается привлекательным вариантом из-за ее превосходной точности при низких условиях освещенности.

Наиболее полно моделирование параметров описано в исследовательской работе [19]. Большинство исследователей имеют аналогичную точку зрения относительно зависимостей параметров от интенсивности освещения и температуры модулей, но в отношении расчёта самой величины интенсивности и температуры модуля мнения разнятся. Температура модуля зависит от множества внешних и внутренних процессов, что сказывается на качестве моделирования. Интенсивность излучения также является величиной, зависящей от множества параметров, что создаёт основу для применения различных математических моделей с той или иной степенью допущения.

С использованием подхода Rш-модели определяются основные параметры работы ФЭМ в данной работе. На значения параметров уравнения (1.5) влияет угол падения солнечного излучения, мощность излучения и температура ячеек модуля. Данные, представленные в паспорте ФЭМ, отображают значения для определённых стандартных условий работы, которым соответствует плотность потока излучения $E_0 = 1000 \text{ Вт/м}^2$ и температура ячеек $T_0 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Зависимость фототока при текущих значениях температуры определяется зависимостью [20]:

$$I_{фТ} = \frac{E}{E_0} \left(I_{фТ_0} + \alpha_{кз}(T - T_0) \right),$$

где $\alpha_{кз}$ – температурный коэффициент тока короткого замыкания;

$I_{фТ_0}$ – фототок при условии $E = E_0$.

Ток обратного насыщения [20]:

$$I_0 = I_{0_{\text{реф}}} * \left(\frac{T}{T_0} \right)^3 e^{\frac{1}{k} \left(\frac{E_{g0}}{T_0} - \frac{E_{gb}}{T_0} \right)},$$

где $I_{0_{\text{реф}}}$ – ток обратного насыщения при стандартных условиях;

$E_{g0} = 1,12$ эВ ширина запрещенной зоны.

$E_{gb} = 1,12[1 - 0,0002677(T - T_0)]$,

Зависимость коэффициента качества:

$$a = a_0 * \frac{T}{T_0},$$

где a_0 – коэффициент качества фотоэлектрического диода при стандартных условиях работы диода.

Сопротивление шунта [20]:

$$R_{ш} = R_{ш0} * \frac{E_0}{E},$$

где $R_{ш0}$ – сопротивление шунта при стандартных условиях работы диода.

Ток короткого замыкания:

$$I_{кз} = \frac{I_{фТ}}{1 + \frac{R_{ш0}}{R_{ш}}}.$$

При режиме холостого хода уравнение (0.4) принимает вид, позволяющий определить напряжение холостого хода:

$$0 = I_{фТ} - I_0 \left[e^{\frac{qU_{хх}}{akT}} - 1 \right] - \frac{U_{хх}}{R_{ш}}.$$

Данное уравнение решено методом бисекционного деления.

Если параметры уравнения (0.4) изначально неизвестны, то в таком случае они приближено вычисляются, с учётом следующих допущений:

- фототок $I_{фТ} = I_{кз}$;
- сопротивление $R_{сфэ} = 0$;
- сопротивление $R_{ш} = +\infty$.

Коэффициент качества при условии $E = E_0$ и $T = T_0$ [20]:

$$a_0 = \frac{U_{тмм0} - U_{хх0}}{\ln\left(1 - \frac{I_{тмм0}}{I_{кз0}}\right)},$$

где $U_{тмм0}$ – напряжение в точке максимальной мощности при стандартных условиях;

$I_{тмм0}$ – ток в точке максимальной мощности при стандартных условиях;

$U_{хх0}$ – напряжение холостого хода при стандартных условиях.

Ток обратного насыщения:

$$I_{0,реф} = I_{кз0} * e^{\frac{U_{хх0}}{a_0}}.$$

Разработанная модель работы фотоэлектрического модуля позволяет определять характеристики работы модуля с учётом климатической изменчивости, в т.ч. с учётом влияния температуры, освещённости, прозрачности атмосферы.

Критерием оптимизации моделирования ФЭМ в данной работе принимается максимизация выработки электроэнергии. Задаётся изначальный список моделей ФЭМ, критерий выбора которых может включать различные условия в зависимости от прикладной задачи. Критерии выбора ФЭМ более подробно рассмотрены в работе [21].

Алгоритм определения режимов работы ФЭМ включает следующие этапы: задание исходной мощности, подготовку климатических данных, расчёт величины солнечного излучения и моделирование выработки ФЭМ. Блок-схема реализации процесса изображена на рис. 13.

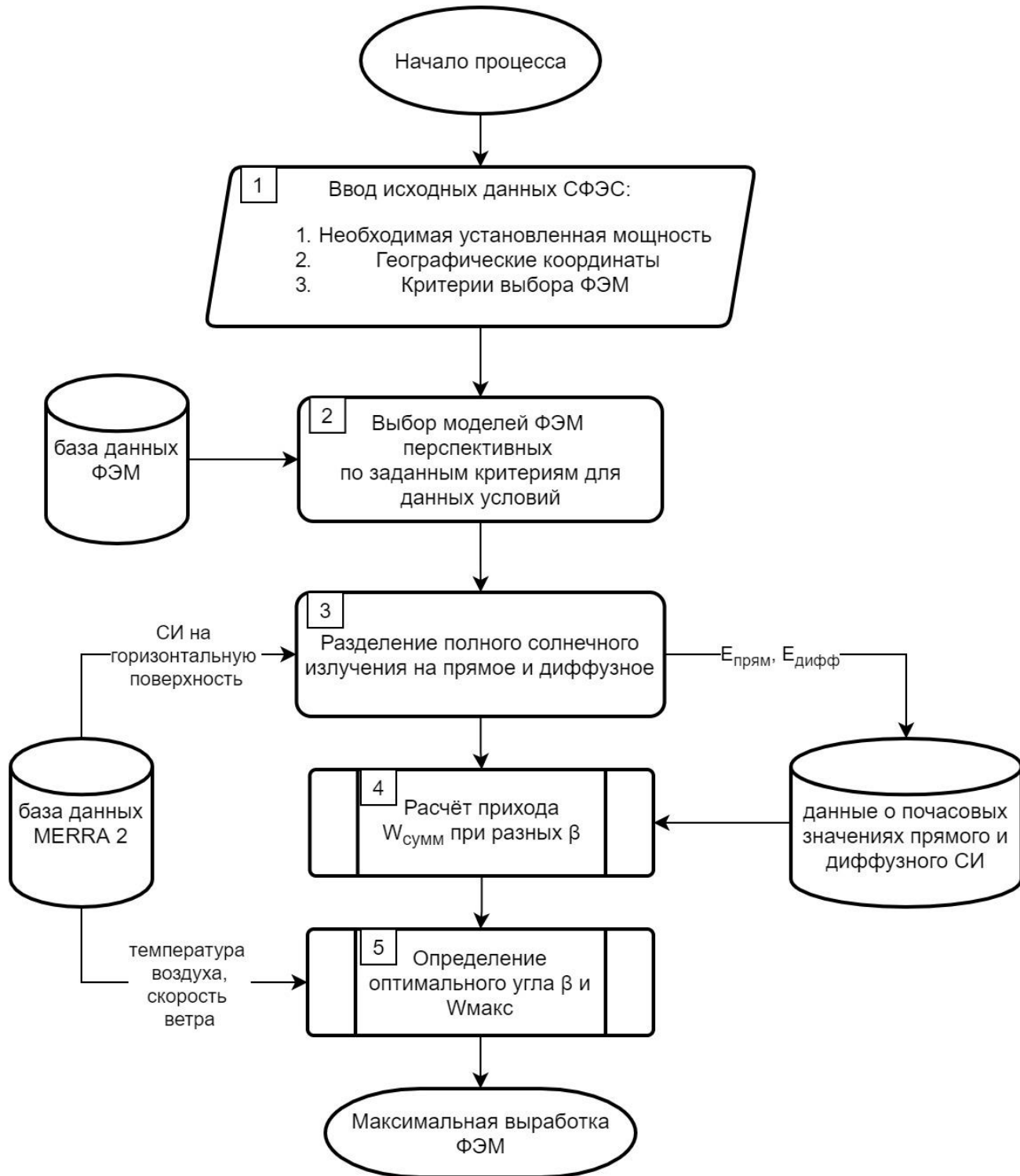


Рис. 13. Алгоритм определения максимальной выработки ФЭМ

В блоке 1 производится ввод исходных данных, необходимых для моделирования географических координат расположения ФЭМ и необходимой установленной мощности энергоустановки.

В блоке 2 производится выбор моделей ФЭМ, перспективных по заданным критериям для данных условий. Критерии могут зависеть от множества причин, включая климатические особенности местности, экономические и логистические ограничения и определяются непосредственно спецификой задачи проектирования СФЭС [21]. В качестве базы данных ФЭМ могут служить различные источники данных, которые содержат необходимые для моделирования параметры. Довольно часто, в спецификациях ФЭМ может отсутствовать достаточный объём технических данных. В таких случаях можно применить методы определения необходимых параметров по представленной в спецификации вольтамперной характеристике [22].

В блоке 3 производится подготовка данных о величине солнечного излучения. Климатические данные для оценки солнечного излучения могут быть получены с использованием натуральных наблюдений или баз статистических данных. Наиболее перспективным источником статистических данных может служить база реанализа климатических данных - NASA MERRA2. Данная база содержит почасовые данные о величине полного СИ и покрывает всю поверхность земного шара, поделённую на узлы с шагом 0,5 градусов по широте и 0,625 градусов по долготе [23]. Пример визуализации значений полного СИ из данной базы представлен на рис. 14.

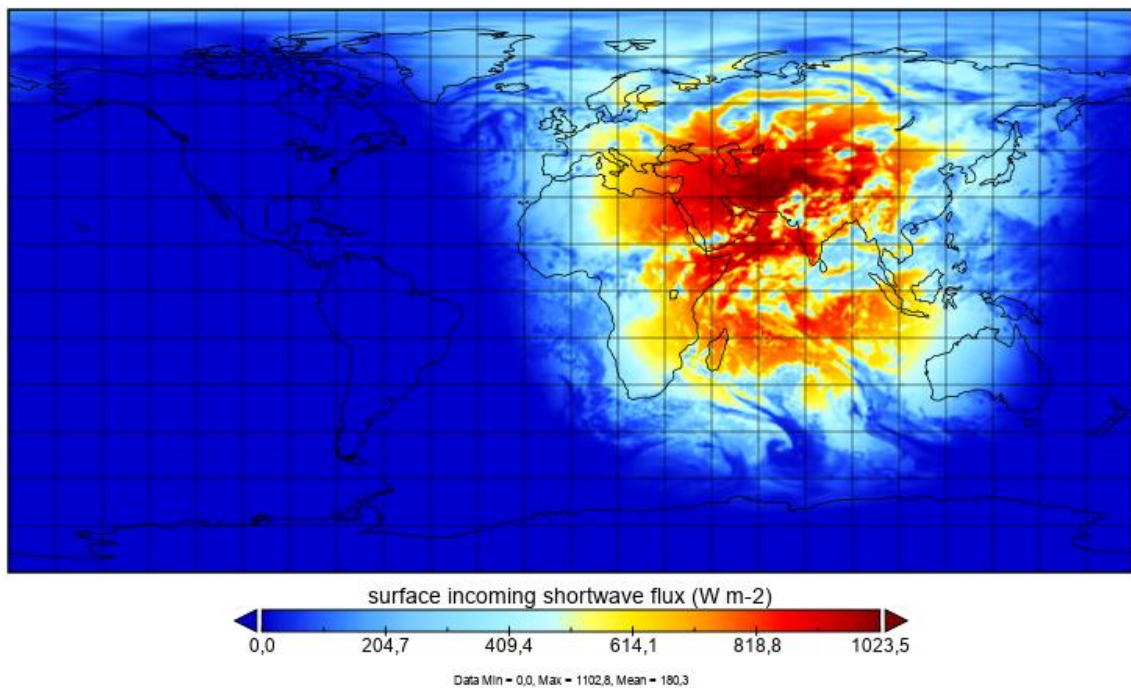


Рис. 14. Карта распределения значений полного солнечного излучения, падающего на горизонтальную поверхность Земли по данным MERRA 2 по состоянию на 16 июня 2020 года 6:00 UTC±00:00 [23].

Важными климатическими данными, влияющими на результат моделирования, также является температура окружающей среды и скорость ветра. Наличие значений этих параметров позволяет моделировать изменение температуры модуля, напрямую влияющее на КПД

фотоэлектрического модуля. Данные о СИ содержат только суммарное значение прямого и диффузного излучения, что обуславливает необходимость разделения СИ на две составляющие, необходимые для перерасчёта СИ на ориентированную поверхность. Для решения этой задачи необходимо разложить значение полного СИ на два компонента: прямое и диффузное СИ. Существует множество методик разделения СИ, которые сильно зависят от местности, для которой производится расчёт. Рекомендации по выбору модели разложения СИ приведены в [24]. В работе использовано методика разложения по схеме Лю и Джордана.

В блоке 4 производится расчёт СИ при разных углах установки ФЭМ β .

Алгоритм расчёта представлен на рис. 15. Ориентация фотоэлектрических модулей определяется двумя параметрами: азимут γ и угол наклона ФЭМ относительно горизонтальной поверхности β . Существует несколько вариантов крепления фотоэлектрических модулей, предусматривающих как статическую фиксацию с фиксированными азимутом и углом наклона, так и динамическую, с возможностью изменения ориентации ФЭМ в пространстве по одной или по двум осям. Наиболее распространённой схемой позиционирования фотоэлектрических модулей в СФЭС мегаваттного класса является фиксированная ориентация с нулевым значением азимута, не меняющаяся со временем. Это обусловлено, в первую очередь, простотой установки и низкими затратами на опорные конструкции. В условиях, когда ориентация ФЭМ статична, крайне важную роль играет выбор оптимального угла наклона и азимута, который влияет на итоговую выработку электричества. Далее в работе рассматривается алгоритм определения оптимального значения наклона ФЭМ при условии, что азимут ФЭМ равен нулю.

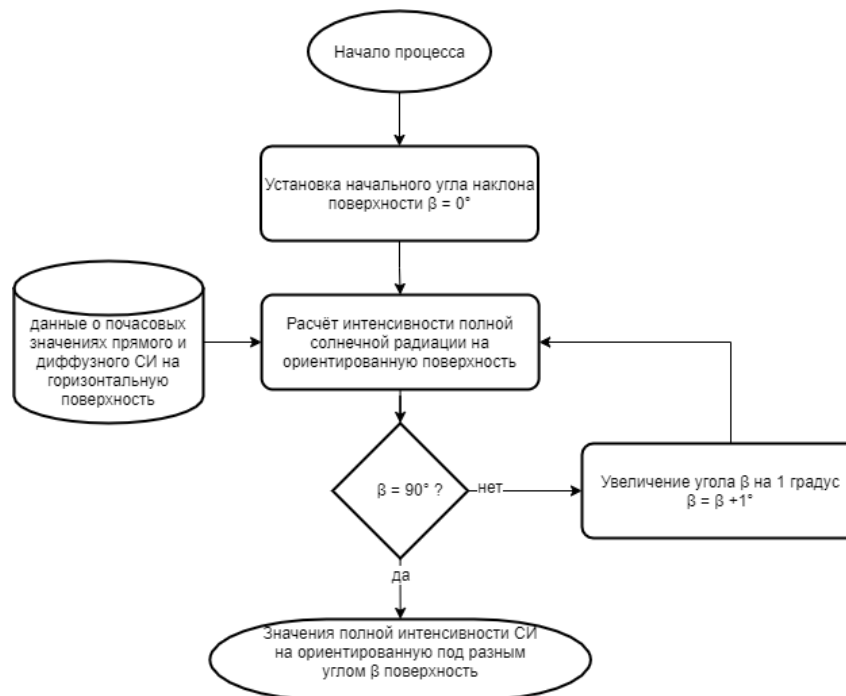


Рис. 15. Расчёт прихода сумм полного солнечного излучения при разных углах β

В блоке 5 производится расчёт полной интенсивности СИ последовательно для диапазона угла наклона $\beta = 0 - 90^\circ$. Последовательность процесса определения значений

интенсивности СИ и выработки ФЭМ последовательно для диапазона угла наклона от 0 до 90 градусов представлена на рис. 17 по зависимостям описанным во второй главе.

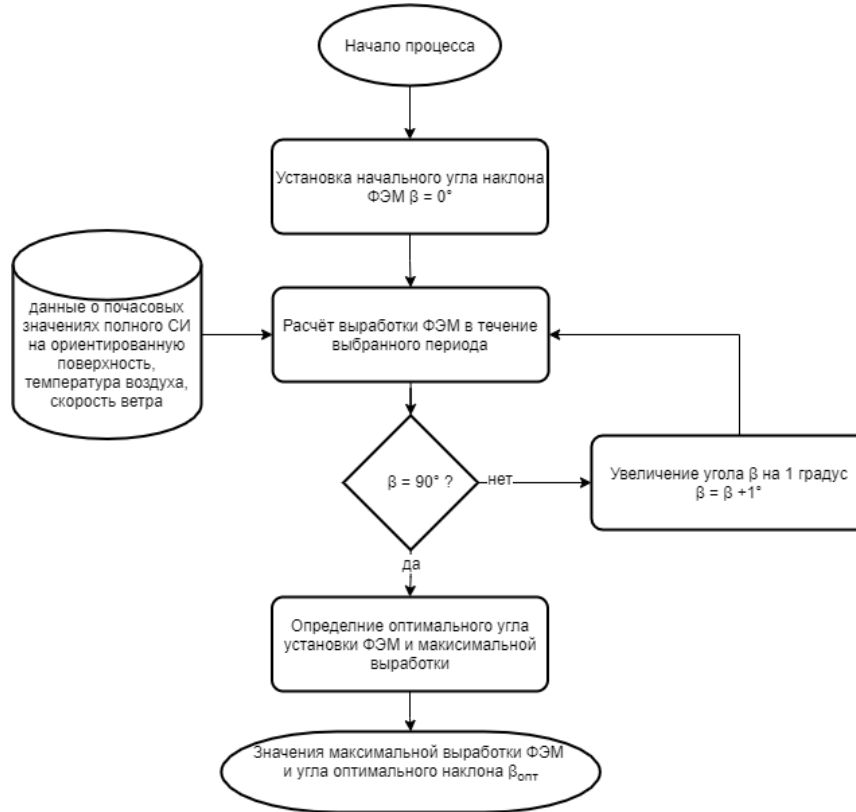


Рис. 16. Моделирование работы ФЭМ при разных углах β .

Расчёт выработки ФЭМ в течение года определяется по формуле:

$$W_{\text{год}} = \sum_{i=1}^n W_i,$$

где W_i – выработка за i -й час;

$n = 8760$ – количество часов году.

Выработка за i -й час определяется по формуле:

$$W_i = P_i \cdot t_i, \quad (0.6)$$

где P_i – мощность ФЭМ в точке максимальной мощности в ваттах, $t_i = 1$ – расчётный интервал времени в часах. Деление на более короткие интервалы моделирования не имеет смысла, ввиду незначительного увеличения точности моделирования при несоизмеримом усложнении процесса моделирования [25].

Электрическая мощность ФЭМ определяется по формуле:

$$P_i = I_i \cdot U_i, \quad (0.7)$$

где I_i – величина электрического тока, А; U_i – напряжение, В.

Зависимость тока от напряжения определяется вольтамперной характеристикой ФЭМ.

Используя приведённые формулы, можно определить параметры $I_{кз}$, U_{xx} , $I_{фт}$, $R_{ш}$ и $R_{сфэ}$, которые в свою очередь позволяют численно определить значения тока при разных значениях напряжения и найти точку максимальной мощности ФЭМ и соответствующие значения $U_{тмм}$, $I_{тмм}$ и $P_{тмм}$ при температуре ФЭМ T и плотности излучения E . Далее по формуле 1 определяется выработка для каждого часа в течение года и определяется суммарное значение.

Сравнивая полученные результаты выработки ФЭМ для разных углов установки, определяется максимальная выработка и соответствующий ей оптимальный угол установки ФЭМ. В математическом виде задача описывается выражением:

$$W(\beta_{\text{опт}}) = \max (W(\beta)).$$

Важнейшим элементом в составе фотоэлектрической инверторное оборудование.

Моделирование режима работы инвертора позволяет оценить характерные показатели эксплуатации: коэффициент загрузки инвертора и коэффициент полезного действия [26].

Мощность на один инвертор определяется по формуле:

$$P_{dc} = \frac{P_{dc,net}}{N}, \quad (27)$$

где N – количество инверторов в системе.

Номинальная мощность на входе в инвертор:

$$P_{dc,0} = \frac{P_{ac,0}}{\eta_0} \quad (28)$$

где $P_{ac,0}$ – номинальная мощность переменного тока инвертора

η_0 – КПД инвертора при номинальной мощности

Зависимость величины мощности после преобразования тока:

$$P_{ac} = \left[\frac{P_{ac,0}}{A - B} - C * (A - B) \right] (P_{dc} - B) + C * (P_{dc} - B)^2 \quad (29)$$

$$A = P_{dc,0} \left(1 + C_1(V_{dc} - V_{dc,0}) \right) \quad (30)$$

$$B = P_{s,0} \left(1 + C_2(V_{dc} - V_{dc,0}) \right) \quad (31)$$

$$C = C_0 \left(1 + C_3(V_{dc} - V_{dc,0}) \right) \quad (32)$$

Потери мощности на собственные нужды:

$$P_{ac,s=0} = \frac{P_{ac,0}}{A} - C * A * P_{dc} + C * P_{dc}^2 \quad (33)$$

Потери на собственные нужды:

$$P_s = \begin{cases} P_{ac,s=0} - P_{ac} \\ 0 \end{cases} \quad (34)$$

В ночное время инвертор будет потреблять энергию из сети, поэтому мощность будет отрицательной:

$$P_{ac} = -P_{nt} \quad (35)$$

При превышении максимальной мощности, часть энергии теряется:

$$P_{clip} = P_{ac} - P_{ac,0} \quad (36)$$

$$\eta_{inv} = P_{ac}/P_{dc} \quad (37)$$

Загрузка инвертора:

$$x = P_{dc}/P_{dc,0} \quad (38)$$

$$P_{ac} = \begin{cases} \eta_{inv} * P_{dc}, & \text{если } \eta_{inv} * P_{dc} \leq P_{ac,0} \\ \eta_{inv} * P_{dc}, & \text{если } \eta_{inv} * P_{dc} > P_{ac,0} \end{cases} \quad (39)$$

Коэффициент, учитывающий потери переменного тока:

$$L_{ac} = L_1 * L_2, \quad (40)$$

где L_1 – коэффициент учёта потерь на проводке;

L_2 – коэффициент учёта потерь на трансформаторе.

Для выбранной модели инвертора определяется необходимое для электростанции количество инверторов:

$$N_{inv} = \frac{P_{ps}}{P_{inv}}, \quad (41)$$

где P_{inv} – максимальная мощность тока, преобразованного инвертором.

Приведенные зависимости использованы при разработке модели инвертора, работающего в составе СФЭС. Разработанные схемы моделирования режимов работы ФЭМ и инвертора объединены в общий алгоритм оптимизации параметров СФЭС (рис. 17).

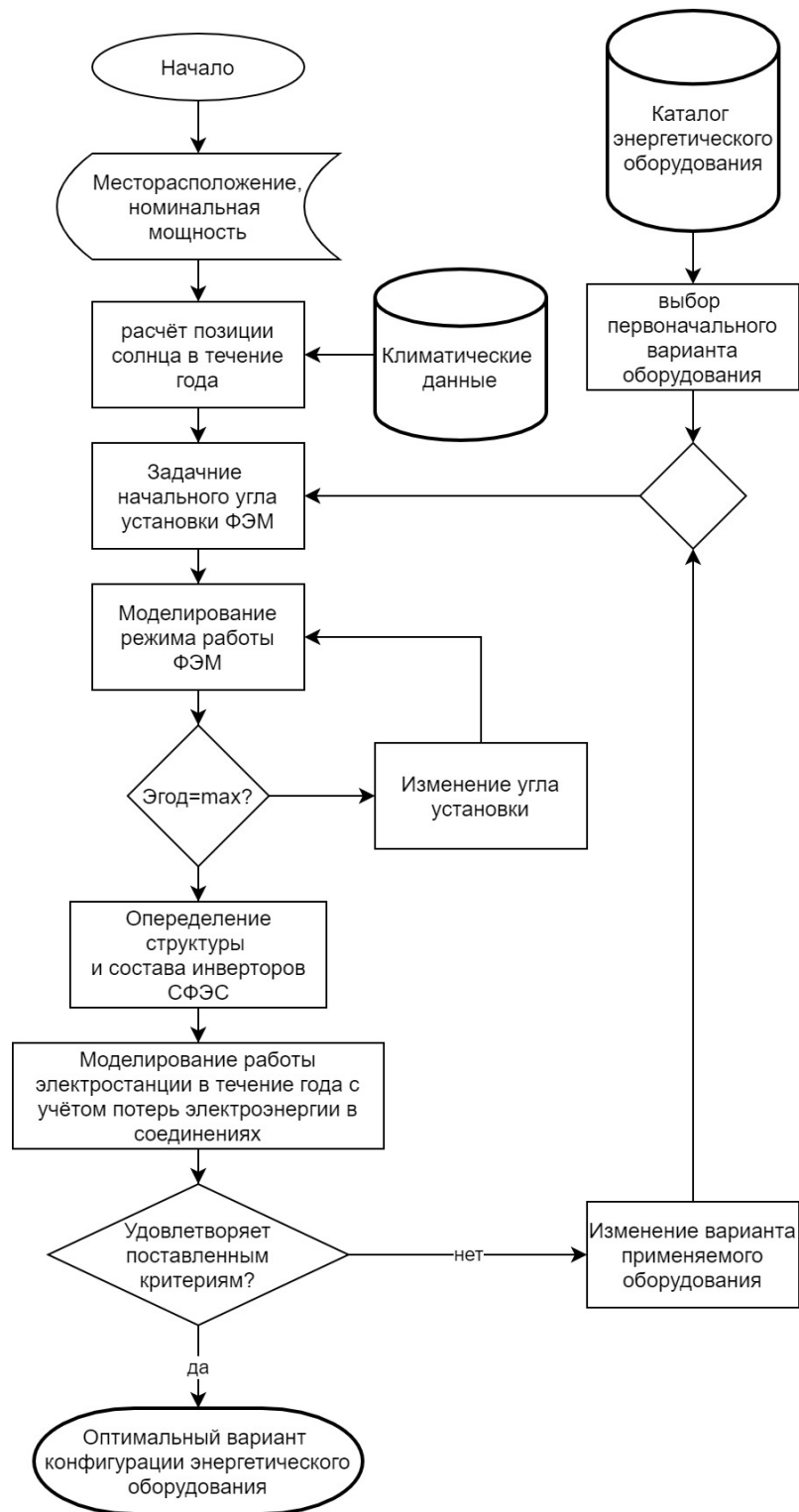


Рис. 17. Алгоритм расчёта параметров солнечной электростанции.

После проведения моделирования режимов работы и параметров ФЭМ, определяется структура и состав инверторного оборудования. К инвертору подключаются фотоэлектрические батареи. Батареи могут иметь различные схемы электрического соединения, включающие в себя как последовательную, так и параллельную электрическую цепь (рис. 18).

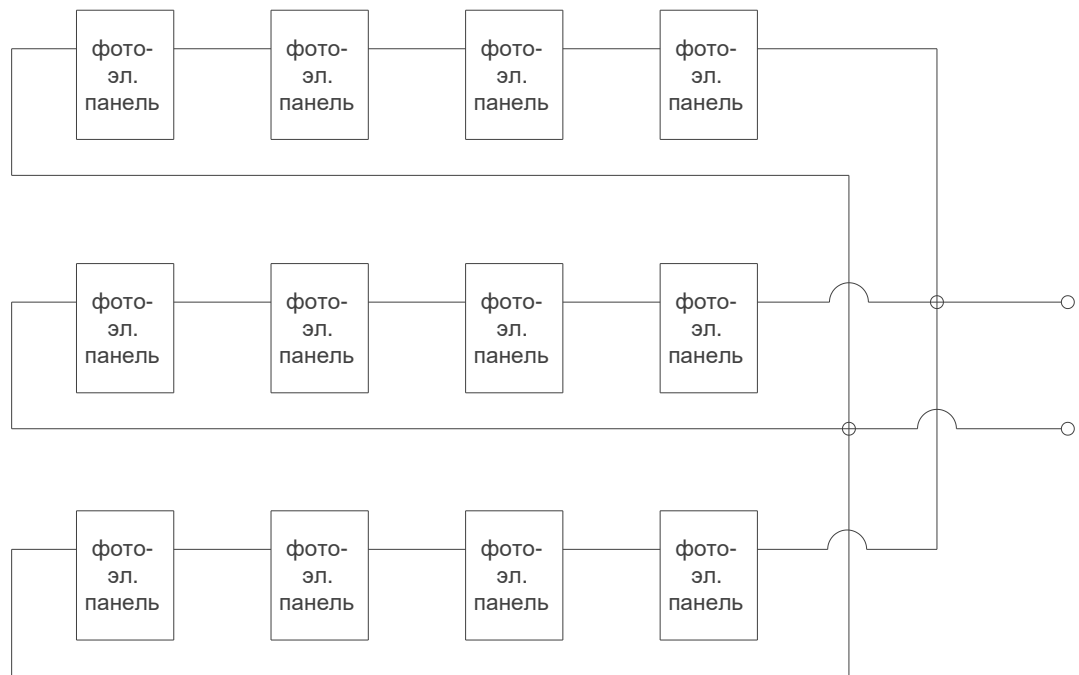


Рис. 18. Схема фотоэлектрических батарей, состоящей из 3 групп последовательно подключённых ФЭМ.

Количество фотоэлектрических батарей, подключаемых к инвертору, соответствует количеству слотов подключения у инвертора.

Электрическая мощность каждой составной сборки вычисляется по формуле:

$$P_{\text{сост.сб.}} = \frac{P_{ps}}{n_{inv} * n_{con}}, \quad (42)$$

где P_{ps} — мощность электростанции;

n_{con} — количество возможных подключений к инвертору.

Количество фотоэлектрических модулей в составе сборки определяется исходя из необходимой мощности:

$$n_{\text{фэм с.с.}} = \frac{P_{\text{сост.сб.}}}{P_{\text{фэм, макс}}}, \quad (43)$$

где $P_{\text{фэм, макс}}$ — максимальная мощность, генерируемая одним ФЭМ, которая определяется по результатам моделирования.

$n_{\text{фэм с.с.}}$ округляется в большую сторону до числа, кратного количеству рядов в сборке.

Фотоэлектрические модули в простой батарее подключаются последовательно, поэтому количество модулей в составе батареи ограничено максимально возможным напряжением

модуля и напряжением инвертора. Количество простых батарей внутри составной батареи определяется по формуле:

$$n_{п.с.} = \frac{n_{фэм\ с.с.} U_{фэм.макс}}{U_{макс}}, \quad (44)$$

где $U_{макс}$ – максимально допустимое напряжение тока, проходящего через ФЭМ.

$U_{мод.макс}$ – максимальное напряжение тока, генерируемого одним фотоэлектрическим модулем, получаемое на основе моделирования.

Вычисленное количество простых батарей округляется до ближайшего целого значения в большую сторону.

Далее определяется количество фотоэлектрических модулей в составе батареи:

$$n_{фэм\ п.с.} = \frac{n_{фэм\ с.с.}}{n_{пс}}. \quad (45)$$

Полученное значение округляется до ближайшего большего целого, кратного количеству рядов модулей в батарее. Из-за данного округления общее количество модулей в составной батарее тоже изменится и его необходимо пересчитать:

$$n_{фэм\ с.с.} = n_{фэм\ п.с.} * n_{п.с.} \quad (46)$$

Далее проводится проверка по силе тока. Ток сложной батареи не должен превышать максимально допустимого значения силы тока инвертора:

$$I_{с.с.} < \frac{I_{inv,max}}{n_{con}}. \quad (47)$$

где n_{con} – количество возможных подключений к инвертору

Максимальная сила тока составной сборки определяется, как сумма максимальной силы тока простых сборок. Если сила тока составной сборки превосходит допустимое значение, то такая конфигурация электроэнергетического оборудования недопустима.

Сечение кабеля сборки определяется, исходя из максимального тока, полученного при моделировании модуля:

$$S = \frac{I}{p}. \quad (48)$$

Где p – электропроводность, для меди $p = 10 \text{ А}$.

Полученное значение округляется до ближайшего большего значения из ряда стандартных сечений.

Сечение кабеля для составной сборки определяется аналогично, сила тока будет равна сумме сил тока простых сборок.

Далее производится расчёт параметров и оптимизация состава СФЭС с учётом климатических характеристик района размещения, на основе предложенного алгоритма. Учитывается схема и состав инверторного оборудования, типа и параметров ФЭМ, оптимальный угол их установки и максимизации выработки, потери в кабелях.

Разработанный алгоритм реализован в виде компьютерной программы с веб-интерфейсом. Существует целый ряд программных комплексов, которые можно использовать, но часть из них не позволяет выполнить все задачи, а другая часть является платной для использования. Компьютерная реализация создана в виде серверной программы, имеющей веб-интерфейс в виде HTML-страниц. Использована архитектура модель-контроллер-представление (MVC), с добавлением слоя сервисов. Схема приложения показана на рис. 19.



Рис. 19. Архитектура программы типа модель-представление-контроллер.

Объектно-ориентированный язык программирования Java позволяет создавать информационные модели реальных объектов, наделять их собственным состоянием и поведением.

Для моделирования электростанции созданы программные модели, моделирующие физические элементы электростанции, оборудование и процессы.

PowerStation – класс, моделирующий объект СЭФС. Объект типа PowerStation содержит информацию о характеристиках электростанции, климатической информации и используемом оборудовании. Объект также имеет несколько публичных методов:

1) `getPowerFromOneInverter(operation,overLoad)` – метод принимает на вход два параметра: `operation` типа `SolarModule.Operation` (режим работы модуля) и `overLoad` логического типа (разрешение на перегрузку инвертора). Возвращает значение мощности инвертора при данном режиме работы модуля.

2) `getCurrentPower(operation)` – метод для получения значения мощности электростанции при данном режиме работы модуля.

3) `calculateOneYear(betta)` – метод, для моделирования работы ФЭМ в течении одного года. На вход принимает значение угла установки ФЭМ. Возвращает объект типа `Map` (карта значений), где ключом является время года, а значением объект типа `SolarModule.Operation`.

4) `calculateMaxOperation()` – метод, вычисляющий максимальные характеристики режимов работы ФЭМ.

SolarModel – класс, моделирующий объект солнечной ФЭМ, содержащий информацию о электрических и физических параметрах ФЭМ. Объект типа `SolarModel` содержит два публичных метода:

1) `getHorizontalSize` – для получения горизонтального размера ФЭМ, с учётом ориентации портретная/альбомная. Тип ориентации передаётся в качестве параметра.

2) `getOperation` – метод для определения режима работы ФЭМ, возвращает объект типа `SolarModule.Operation`. На вход подаются климатические данные:

- температура воздуха
- значение прямой радиации
- значение диффузной радиации
- скорость ветра
- координаты солнца
- угол установки β .

Класс `SolarModule.Operation` хранит информацию о вольтамперной характеристике ФЭМ для конкретных внешних условий.

Inverter – класс, моделирующий объект инвертора. Объект типа `Inverter` имеет один публичный метод - `calculateACPower(P_dc, V_dc)`. Данный метод вызывается при расчёте мощности инвертора. В качестве параметров метода передаются мощность и напряжение постоянного тока.

Почасовые данные о климатических параметрах хранятся в объектах типа `LocalData` и могут быть получены с помощью метода `getValue`, которому передаётся значение времени в виде объекта `ZonedDateTime`.

Координаты электростанции хранятся в объекте типа `Position`. Координаты определяются тремя параметрами: широта, долгота и превышение над уровнем моря, в метрах.

Координаты солнца хранятся в объекте типа `SunPosition`. При создании объекта, конструктору передаются координаты места расположения электростанции и время типа `ZoneDateTime`, затем в конструкторе происходит расчёт координат солнца относительно позиции электростанции и инициализация полей объекта.

Класс `Battery` моделирует объект батареи солнечных модулей. У объектов типа `Battery` есть единственный публичный метод `getP_max`, принимающий на вход объект типа `SolarModule.Operation` (характеристика работы фотоэлектрического модуля) и возвращающий значение мощности батареи.

Массив батарей моделируется классом `Array`. Объект типа `Array` также имеет метод `getP_max`, но возвращает этот метод суммарное значение мощности всех батарей в массиве.

Класс `Cable` моделирует кабель. При создании объектов типа `Cable` конструктору объекта передаётся максимальная мощность и напряжение, на основе чего подбирается

сечение кабеля с учётом допустимых потерь напряжения. Объект типа Cable имеет один публичный метод.

Алгоритм расчёта:

1. Ввод пользователем исходных параметров электростанции: имя, координаты, номинальная мощность, смещение часового пояса (рис. 20).

Мегра 2

<p>Навигация</p> <ul style="list-style-type: none"> Загрузка данных Мои данные Мои проекты Солнечные модули 	<p>Добавление нового проекта:</p> <p>Название:</p> <input type="text"/> <p>Широта:</p> <input type="text"/> <p>Долгота:</p> <input type="text"/> <p>Превышение над уровнем моря:</p> <input type="text"/> <p>Номинальная мощность в кВт:</p> <input type="text"/> <p>Смещение часового пояса:</p> <input type="text"/> <p>Создать</p>
---	--

Рис. 20. Форма ввода исходных данных.

2. После получения программой исходных параметров, создаётся объект типа PowerStation и заполняются поля, соответствующие принятым данным. Из базы данных загружается информация о климатических параметрах для заданных координат.

3. В разделе редактирования пользователь устанавливает конкретную модель инвертора и ФЭМ. После чего, приложением из базы данных собирается информация о выбранном оборудовании, создаются соответствующие объекты и связываются с объектом PowerStation.

4. На странице информации об электростанции появляется кнопка «Оптимизировать угол установки», нажав на которую, пользователь запускает алгоритм поиска угла установки ФЭМ. После определения угла установки, становится доступным расчёт электрической цепи, идущей на одно подключение к инвертору.

5. Рассчитывается электрическая цепь, на основе допустимых значений силы тока и напряжения на инверторе. В случае, если ФЭМ и инвертор не подходят по значениям тока и напряжения выводится ошибка.

6. Пользователем задаются длины кабелей от инвертора до щита постоянного тока (ЩПТ) и от ЩПТ до ФЭМ, включительно. Приложение на основе длин кабелей и рабочего напряжения подбирает сечение кабеля, создаётся список объектов типа «Cable» с соответствующими атрибутами.

7. После задания длин кабелей производится моделирование работы электростанции в течение года. Формируется страница отчёта, содержащая значения коэффициент использования установленной мощности, степень загрузки инвертора, годовая выработка, количество ФЭМ и инверторов. Пример отображения отчёта приведен на рис. 21.

Годовая выработка:	8 214,541 МВтч
КИУМ	9,38%
Максимальная нагрузка инвертора	99,72%
Рабочее напряжение постоянного тока	0 В
Максимальное напряжение холостого хода постоянного тока	816,57 В
Количество инверторов	10
Общее количество панелей	36720
Длины кабелей, используемых на электростанции:	
Кабели от инвертора до сборки панелей	
25.0	24000.0
Кабели сборки панелей	
16.0	216000.0

Рис. 21. Информация по результатам годового моделирования электростанции.

В четвёртой главе описана апробация результатов на примере моделирования СФЭС мощностью 10 МВт в Ставропольском крае.

С использованием разработанного алгоритма и программы решена задача оптимизации параметров фотоэлектрической станции, мощностью 10 МВт в районе г. Ставрополь, Россия. Географические координаты точки расположения установки: 45° с.ш., 42° в.д рис. 22.



Рис. 22. Космический снимок месторасположения СФЭС.

Климат местности характеризуется как континентальный, с большой долей прямого солнечного излучения. Перспективными ФЭМ с точки зрения доступности на рынке и эффективности работы в обозначенных климатических условиях являются модели: Applied Quantum Technology AQT156PA-220W, Sopray Energy SR156P-220 и NICOR NS-H220P60-01, характеристики которых представлены в таблице 3.

Таблица 4. Характеристики выбранных для моделирования ФЭМ.

Модель ФЭМ	Quantum Technology AQT156PA-220W	Sopray Energy SR156P-220	NICOR NS-H220P60-01
P_{mpp0} , Вт	220,177	220,222	219,876
Площадь, м ²	1,623	1,621	1,623
$I_{фт0}$, А	8,002413	8,017117	7,971613
$I_{кз0}$, А	8	8	7,53
$U_{хх0}$, В	36,24	36,8	29,2
$R_{ш0}$, Ом	1069,044	150,81	1786,04
α_0	1,581904	1,573491	1,492901
$R_{сфэ}$, Ом	0,32245	0,322672	0,361601
$\alpha_{кз}$	0,005424	0,006	0,003347

По данным из MERRA 2 получены значения полного солнечного излучения на земную поверхность и солнечное излучение в верхнем слое атмосферы (рис. 23).

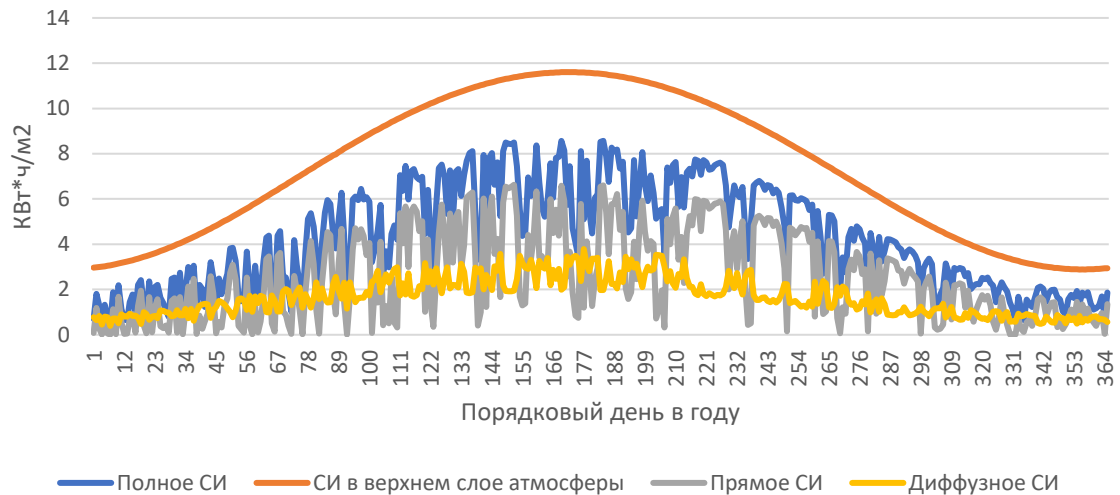


Рис. 23. Данные о величине солнечного излучения в течение года в г. Ставрополь по данным MERRA 2.

На основе полученных данных произведён расчёт прямого и диффузного солнечного излучения, с последующим определением полного солнечного излучения на ориентированную поверхность.

На основе полученных данных о солнечном излучении производится моделирование выработки для выбранных ФЭМ, по результатам которого выбран оптимальный угол установки ФЭМ. Учитывая шаг изменений в 1 градус, доверительным интервалом является 30-32°. Результаты моделирования по оптимизации угла наклона ФЭМ и выбору оптимального типа модуля представлены на рис. 24.

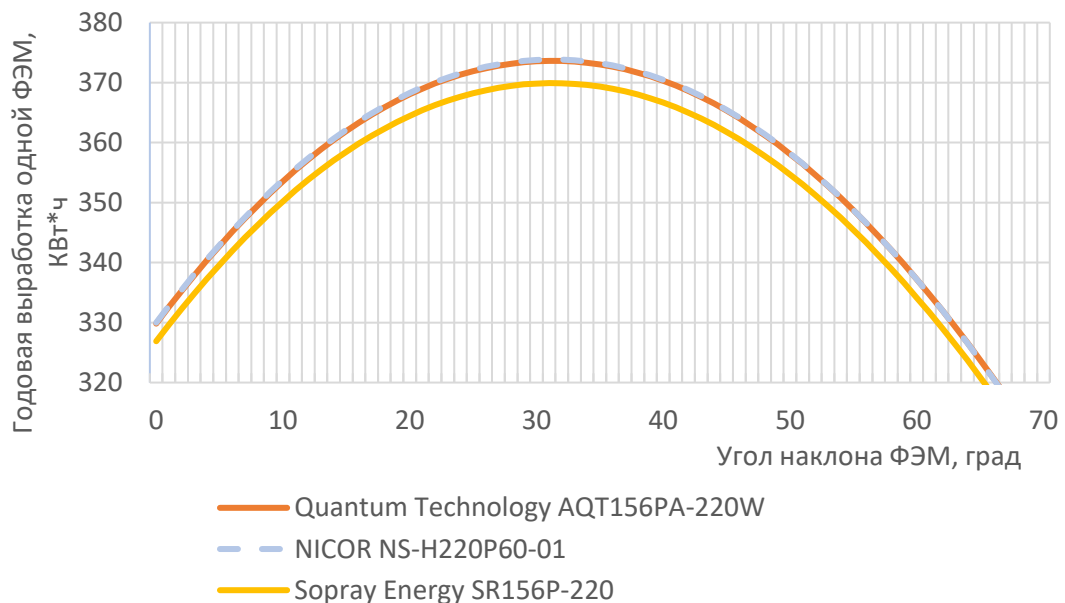


Рис. 24. Зависимость годовой выработки ФЭМ от угла установки.

Результаты вычисления оптимальных параметров фотоэлектрической станции мощностью 10 МВт для климатических условий местоположения в Ставропольском крае приведены в табл. 4.

Таблица 5. Результаты моделирования ФЭМ.

Модель ФЭМ	Оптимальный угол β , град	Количество ФЭМ	Выработка в течение года, МВт-ч
Quantum Technology AQT156PA-220W	31	45420	16968
NICOR NS-H220P60-01	31	45410	17174
Sopray Energy SR156P-220	31	45480	16822

Все три рассматриваемых ФЭМ имеют одинаковое оптимальное значение угла наклона. Характер зависимости годовой выработки ФЭМ от угла наклона имеет выпуклую форму с экстремумом в точке оптимального угла наклона. Используемый алгоритм не учитывает эффекты взаимного затенения, что может сказаться на точности моделирования в условиях низких значений высоты солнца, а также эффекты затенения объектами окружающего рельефа местности. Модуль NICOR NS-H220P60-01 имеет максимальное значение выработки при наименьшем требуемом количестве ФЭМ для обеспечения номинальной мощности. Описанные преимущества определяют выбор в пользу данной модели ФЭМ.

Согласно [26] наиболее оптимальным вариантом для СФЭС более 10 МВт является централизованная схема, которая подразумевает использование небольшого количества инверторов большой мощности.

Максимальная загрузка инвертора ABB ULTRA-1050.0-TL может составлять 110%, поэтому количество ФЭМ регулировалось исходя из данного ограничения. КИУМ электростанции рассчитывается по отношению к мощности инверторного оборудования, либо к мощности ФЭМ. Наиболее значимой характеристикой является КИУМ по мощности ФЭМ, так как данный параметр напрямую связан с капитальными затратами на строительство электростанции.

Определён план размещения ФЭМ. Модули расположены в два ряда с вертикальной ориентацией. Батареи выстраиваются таким образом, чтобы кабели с отдельных батарей, приходящие на щит распределительный постоянного тока, были как можно короче.

Батареи конструктивно соединяются в один ряд, который образует одну электрическую цепь, подключённую к инвертору через щит постоянного тока (ЩПТ). Сам щит располагается по середине этого ряда. Длина ряда определяется по формуле:

$$L_{\text{ряд}} = L_{\text{ФЭМ}} \cdot \frac{N_{\text{ФЭМ}}}{n_{\text{ряд}}} \quad (49)$$

$$L_{\text{ряд}} = 1 \cdot \frac{240}{2} = 168 \text{ м.}$$

Батареи, состоящие из 16 ФЭМ, соединяются в ЩПТ с помощью кабелей. Батареи выстраиваются в один ряд, образуя массив батарей. Рядом с каждым массивом устанавливается ЩПТ, кабель от которого идёт на одно из подключений инвертора. Инвертор устанавливается между равными количествами массивов, которые к нему подключаются. Таким образом, инвертор и все подключённые к нему фотоэлектрические модули образуют кластер батарей размером 120x202,4 метров (рис. 25).

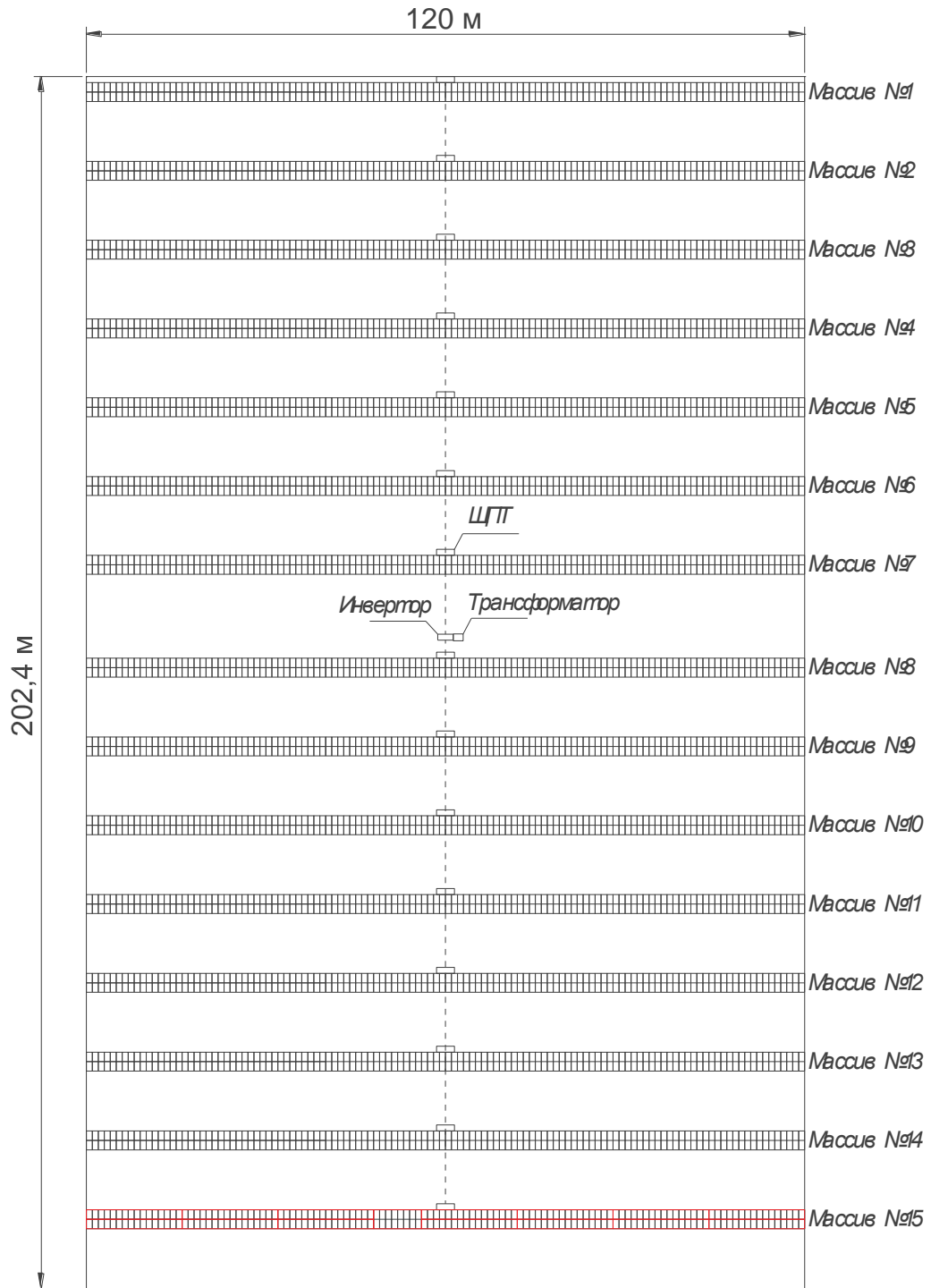


Рис. 25. Схема кластера ФЭМ с центральным инвертором.

Из 10 подобных кластеров составляется электростанция, схема которой приведена на рис. 26.



Рис. 26. Схема солнечной электростанции с центральным инвертором.

Расстояние между рядами ФЭМ принимается равным 10 м. Потери от собственного затенения фотоэлектрических модулей составляет 2,54 %. Таким образом, выработка электростанции составит:

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = 17174 * (1 - 0,0254) = 16730 \text{ МВт} * \text{ч}$$

$$\text{КИУМ} = \frac{16730}{8760 * 10} = 0,191$$

Потери напряжения в кабеле переменного тока низкого напряжения, соединяющего инвертор и открытое распределительное устройство, будут превышать 5% даже при максимальном допустимом сечении кабеля. Поэтому для передачи энергии от инвертора на подстанцию используется повышающие трансформаторы ТМЗ 1000/10/04 и трёхжильные алюминиевые кабели. Расчёт сечения каждого кабеля производится из условия допустимой потери напряжения в 5% в линии. Длина кабельных линий, соединяющих все инверторы, составляет 1844,8 м.

Полученные параметры электростанции:

Оптимальный вариант ФЭМ – NICOR NS-H220P60-01 45410 шт.

Оптимальный угол наклона ФЭМ: 31 град.

Инверторное оборудование 8 инверторов ABB ULTRA-1050.0-TL.

Годовая выработка СФЭС $\mathcal{E}_{\text{год}} = 16730 \text{ МВт} * \text{ч}$.

Коэффициент использования мощности 0,191.

Заключение

Основные результаты работы:

1. Проанализировано текущее развитие фотоэнергетики в мире и России. Общемировые темы прироста установленной мощности СФЭС составляют более 20% на протяжении последних 10 лет. В России создана и реализована законодательная база, обеспечивающая устойчивое развитие отрасли сетевой фотоэнергетики. Максимальная мощность построенной в России СФЭС составляет 105 МВт.
2. Разработан алгоритм оптимизации параметров СФЭС по критерию максимизации выработки в условиях климатической изменчивости с рассмотрением различных вариантов ФЭМ.
3. Разработана математическая модель работы фотоэлектрического элемента с учётом климатической особенностей (интенсивность, температура, облачность, скорость ветра, прозрачность атмосферы).
4. Разработан алгоритм комплексного моделирования режимов работы СФЭС с учётом климатических факторов и вариативности используемых ФЭМ, учитывая потери электроэнергии в инверторном оборудовании и электрических соединениях.
5. Разработана программа выбора и оптимизации параметров СФЭС с использованием языка программирования Java, реализующая предложенный алгоритм. Данная программа использована при апробации результата исследований.
6. Разработанная методика апробирована на примере расчёта СФЭС в Ставропольском крае мощностью 10 МВт. Оптимальным вариантом из заданных условий ФЭМ является модель NICOR NS-H220P60-01, оптимальный угол наклона ФЭМ равен 31 град., необходимое количество ФЭМ для обеспечения установленной мощности составляет 45410 шт. В моделировании использовано инверторное оборудование центрального типа - ABB ULTRA-1050.0-TL. Рассчитанная годовая выработка составила 16730 МВт*ч, КИУМ=0,191

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Fred M. Global resource depletion // *Monthly Review*, Vol. 64, No. 8, 2013. pp. 13-28.
2. Mucahit A. Renewable and non-renewable electricity consumption–economic growth nexus: evidence from OECD countries // *Renewable energy*, Vol. 139, 2019. pp. 599-606.
3. Chovancová J., Juraj T. Decoupling economic growth from greenhouse gas emissions: The case of the energy sector in V4 countries // *Equilibrium. Quarterly Journal of Economics and Economic Policy*, Vol. 15, No. 2, 2020. pp. 235-251.
4. Vasylieva , Lyulyov O., Bilan , Streimikiene D. Sustainable economic development and greenhouse gas emissions: The dynamic impact of renewable energy consumption, GDP, and corruption // *Energies*, Vol. 12, No. 17, 2019. P. 3289.
5. Alagappana L., Orasna R., Woad C.K. What drives renewable energy development? // *Energy Policy*, Vol. 39, No. 9, сентябрь 2011. pp. 5099-5104.
6. Whiteman A., Rueda S., Akande , Elhassan N., Escamilla G., Arkhipova. Renewable energy statistics 2020 2020. URL: <https://www.irena.org/publications/2020/Jul/Renewable-energy-statistics-2020> (дата обращения: 22.02.2021).
7. Основные характеристики российской электроэнергетики [Электронный ресурс] URL: <https://minenergo.gov.ru/node/532> (дата обращения: 22.февраль.2021).
8. Дегтярев К.С. Состояние и территориальная организация фотовольтаической солнечной энергетики в России // *Окружающая среда и энерговедение*, Vol. 1, No. 1, 2019. pp. 23-38.
9. Федеральный закон от 26.03.2003 № 35-ФЗ (ред. от 27.12.2019) «Об электроэнергетике» // СПС КонсультантПлюс.
10. Бекулова С.Р. Формирование институциональной среды, способствующей развитию возобновляемой энергетики в России // *Теоретическая и прикладная экономика*, No. 4, 2020. pp. 66-80.
11. Литифов А.С., Рашидханов А.Т. Перспективы применения солнечных космических электростанций // *Современные проблемы электроэнергетики и пути их решения : Материалы III Всероссийской научно-технической конференции*. Махачкала. 2018. pp. 242-244.
12. Pannase V.R., Nanavala H. A review of PV technology power generation, PV material, performance and its applications // *2017 International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC)*.
13. Ge J., Yan Y. Synthesis and characterization of photoelectrochemical and photovoltaic Cu₂BaSnS₄ thin films and solar cells // *Journal of Materials Chemistry C*, Vol. 5, No. 26, 2017. pp. 6406-6419.

14. Kusuma J., Balakrishna G. Exploration of graphene oxide nanoribbons as excellent electron conducting network for third generation solar cells // *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 183, 2018. pp. 211-219.
15. Бобков В.А., Елистратов В.В. Моделирование режимов работы фотоэлектрического модуля и оптимизация угла наклона по критерию максимальной выработки электроэнергии // *Гелиотехника*, Vol. 57, No. 3, 2021.
16. Sen Z. *Solar energy fundamentals and modeling techniques: atmosphere, environment, climate change and renewable energy*. Springer Science & Business Media ed. 2008.
17. Васильев А.В., Мельникова И.Н. Коротковолновое солнечное излучение в атмосфере Земли. Расчеты. Измерения. Интерпретация // *СПб. НИИХ СПбГУ*, Vol. 388, 2002.
18. Robert W. Calculating the position of the sun // *Solar energy*, Vol. 20, No. 5, 1978. pp. 393-397.
19. Kratochvil J., Boyson W., King D.L. *Photovoltaic array performance model*. United States: Department of Energy, 2004.
20. Chin V.J., Salam Z., Ishaque K. Cell modelling and model parameters estimation techniques for photovoltaic simulator application: A review // *Applied Energy*, Vol. 154, 2015. P. 519.
21. S. Mishra H.Z.O.I.A.M.Z. Selection Map for PV Module Installation Based on Shading Tolerability and Temperature Coefficient // *IEEE J. Photovolt.*, Vol. 9, 2019. pp. 872-880.
22. Huang K.T. Identifying a suitable hourly solar diffuse fraction model to generate the typical meteorological year for building energy simulation application // *Renewable Energy*, Vol. 157, 2020. pp. 1102-1115.
23. Gelaro R., McCarty W., Suárez M.J., Todling R. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) // *Journal of Climate*, Vol. 30, No. 14, 2017. pp. 5419–5454.
24. Gueymard C.A., Ruiz-Arias J.A. Extensive worldwide validation and climate sensitivity analysis of direct irradiance predictions from 1-min global irradiance // *Solar Energy*, Vol. 128, 2016. P. Apr.
25. Бобков В.А. Исследование влияния временного интервала на результаты моделирования фотоэлектрического модуля // *Неделя науки СПбПУ : Материалы научной конференции с международным участием*. Санкт-Петербург. 2018. pp. 100-103.
26. Бобков В.А. Исследование оптимальной структуры инверторного оборудования сетевой фотоэлектрической электростанции // *Неделя науки 2017: материалы научного форума с международным участием*. Санкт-Петербург. 2017. pp. 338-341.

27. Andre T., Guerra F. Renewables 2020 Global Status Report. Paris: REN21 Secretariat, 2020.
28. Priscila Gonçalves Vasconcelos Sampaio M.O.A.G., Sampaio P.G.V., González M.O.A. Prospecting technologies for photovoltaic solar energy: Overview of its technical-commercial viability // International Journal of Energy Research, Vol. 44, No. 2, 2019. pp. 651-668.
29. Sampaio P.G.V., González M.O.A. Photovoltaic solar energy: Conceptual framework // Renewable and Sustainable Energy Reviews, No. 74, 2017. P. 591.
30. Arefifar S.A., Paz F., Ordonez M. Improving Solar Power PV Plants Using Multivariate Design Optimization // IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Vol. 5, No. 2, 2017. pp. 638-650.
31. Елистратов В.В. Солнечная энергетика // In: ВОЗОБНОВЛЯЕМАЯ ЭНЕРГЕТИКА / Ed. by Елистратов В.В. Санкт-Петербург: Издательство политехнического университета, 2016. P. 179.
32. Ратнер С.В., Нижегородцев Р.М. Анализ опыта реализации проектов в области возобновляемой энергетики в России // Теплоэнергетика, No. 6, 2017. pp. 38-47.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ
(ДИССЕРТАЦИИ)

1. Бобков, В. А. Разработка программного модуля подготовки исходных данных для проектирования электростанций на основе возобновляемых источников энергии / В. А. Бобков // Политехническая неделя в Санкт-Петербурге : материалы научного форума с международным участием, Санкт-Петербург, 14–20 ноября 2016 года / Кафедра водохозяйственного и гидротехнического строительства. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2016. – С. 223-224.
2. Бобков, В. А. Сравнительный обзор энергетических характеристик аэродинамических профилей лопастей ВЭУ / В. А. Бобков // НОЦ "Возобновляемые виды энергии и установки на их основе" : Сборник докладов молодежной научно-практической конференции в рамках Недели науки СПбПУ, Санкт-Петербург, 01–06 декабря 2014 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2014. – С. 57-58.
3. Бобков, В. А. Исследование оптимальной структуры инверторного оборудования сетевой фотоэлектрической электростанции / В. А. Бобков // Неделя науки 2017: материалы научного форума с международным участием : Инженерно-строительный институт. Кафедра водохозяйственного и гидротехнического строительства, Санкт-Петербург, 13–19 ноября 2017 года. – Санкт-Петербург: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2017. – С. 338-341.
4. Бобков, В. А. Исследование влияния временного интервала на результаты моделирования фотоэлектрического модуля / В. А. Бобков // Неделя науки СПбПУ : Материалы научной конференции с международным участием. Инженерно-строительный институт, Санкт-Петербург, 19–24 ноября 2018 года. – Санкт-Петербург: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2018. – С. 100-103.
5. Бобков В.А., Елистратов В.В. Моделирование режимов работы фотоэлектрического модуля и оптимизация угла наклона по критерию максимальной выработки электроэнергии // Гелиотехника, т. 57, №. 3, 2021.