

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Санкт–Петербургский горный университет»

*На правах рукописи*

**ГЕРРА Диас Даниель**



**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ  
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ НА ПОДСТАНЦИИ САНТЬЯГО-ДЕ-КУБА**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, доцент  
Шклярский Ярослав Элиевич

Санкт-Петербург-2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |    |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....  | 4  |
| ГЛАВА 1 ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ... 12   |    |
| 1.1    Общая характеристика солнечной энергии.....   | 12 |
| 1.2    Основные характеристики фотоэлементов.....  | 14 |
| 1.2.1 Структура солнечного модуля.....   | 14 |
| 1.2.2 Электротехнические комплексы с солнечными фотоэлементами.....  | 18 |
| 1.2.3 Солнечные электростанции с солнечным трекингом.....  | 20 |
| 1.2.4 Анализ исходных данных объекта для моделирования.....  | 27 |
| 1.3    Анализ публикаций по вопросам прогнозирования производства энергии и работы солнечных комплексов.....           | 28 |
| 1.4    Цели и задачи научно– квалификационной работы.....  | 31 |
| 1.5    Выводы по первой главе.....   | 32 |
| ГЛАВА 2 АНАЛИЗ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ.....                        | 34 |
| 2.1    Климатические условия.....  | 34 |
| 2.1.1 Солнечное излучение.....   | 34 |
| 2.1.2 Относительная влажность и давление.....  | 36 |
| 2.1.3 Температура окружающей среды и скорость ветра.....   | 37 |
| 2.2    Моделирование объекта исследования.....   | 38 |
| 2.2.1 Формирование системы электроснабжения с использованием фотоэлектрической станции.....                            | 39 |
| 2.2.2 Математические модели для определения факторов, влияющих на точность прогноза электроэнергии.....                | 55 |
| 2.2.3 Метод поверхности отклика.....   | 56 |
| 2.3    Моделирование нагрузки электротехнического комплекса.....   | 59 |
| 2.4    Выводы по второй главе.....   | 59 |
| ГЛАВА 3 АНАЛИЗ ГЕНЕРАЦИИ И ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ.....  | 60 |
| 3.1    Моделирование изменения погодных условий, влияющих на выработку электроэнергии фотоэлектрическими модулями..... | 60 |
| 3.2    Результаты моделирования.....   | 68 |
| 3.3    Математическое моделирование двухосной системы слежения за Солнцем.....   | 70 |

|         |   |     |
|---------|---|-----|
| 3.3.1   | Экспериментальные исследования систем слежения за Солнцем.....  | 71  |
| 3.3.2   | Структура и функционирование программного обеспечения, разработанного для обработки данных.....           | 77  |
| 3.4     | Определение факторов, влияющих на точность прогноза генерации электрической энергии .....                 | 79  |
| 3.5     | Выводы по третьей главе.....  | 83  |
| ГЛАВА 4 | ТЕХНИКО–ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В СИСТЕМАХ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ ..... | 85  |
| 4.1     | Расчет экономической привлекательности применения фотоэлектрической станции с солнечным слежением.....    | 86  |
| 4.1.1   | Техническая информация.....   | 88  |
| 4.2     | Расчет срока окупаемости и экономический эффект .....   | 96  |
| 4.3     | Алгоритм выбора типа модернизации .....   | 106 |
| 4.4     | Воздействие на окружающую среду .....   | 107 |
| 4.5     | Выводы по четвертой главе.....  | 110 |
|         | ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....  | 112 |
|         | СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....  | 114 |
|         | ПРИЛОЖЕНИЕ А РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ .....  | 130 |
|         | ПРИЛОЖЕНИЕ Б СВИДЕТЕЛЬСТВО О ГОСУДАРСТВЕННОЙ РЕГИСТРАЦИИ ПРОГРАММЫ ДЛЯ ЭВМ .....                          | 138 |

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **Актуальность темы исследования**

Возобновляемая энергетика сегодня показывает стремительный рост в развитии во всех странах, так как вопросы снижения негативного воздействия на окружающую среду, а также поиск альтернатив углеводородному топливу при производстве электрической энергии являются актуальными. Однако существует ряд сдерживающих развитие факторов. К таким факторам относятся – эффективность, стоимость, отсутствие технологий, рационального питания электроустановок потребителей.

Во многих странах на государственном уровне осуществляется поддержка организаций, компаний, а также частных лиц, использующих солнечные электростанции, ветрогенераторы, микро-гидроэлектростанции и другие. Наибольшее распространение среди них сегодня для выработки электрической энергии получили солнечные электростанции, осуществляющие электроснабжение предприятий на напряжении 13,8кВ.

В Республике Куба применяются солнечные фото-электростанции (ФЭС). Однако несмотря на то, что Куба обладает огромным потенциалом солнечной энергии, так как находится в тропическом поясе со среднегодовым значением солнечного излучения  $5 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$  при минимальном и максимальных значениях  $4 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$  и  $6 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$  соответственно, эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую, на данный момент, находится на низком уровне. Стоимость производства электроэнергии с помощью ФЭС очень высока. Основными причинами сложившейся тенденции являются:

1. Устаревшие модели солнечных батарей и технологии, используемые в электротехнических комплексах.
2. Отсутствие системы управления, учитывающей изменение таких факторов как солнечная активность в различное время года и климатические

условия (относительная влажность, атмосферное давление, а также температура окружающей среды и солнечное излучение), изменение положения солнца в течение дня и характер нагрузки.

3. Социально– экономические условия в Республике Куба, ограничивающие развитие солнечной энергетики.

Применение систем слежения за Солнцем является одним из способов повышения эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую. Однако требует комплексного анализа характеристик региона, разработки системы управления с учетом климатических и социально– экономических условий, и обеспечения должного качества электроэнергии в системе электроснабжения предприятий.

Все вышеперечисленное свидетельствует об актуальности диссертационной работы.

### **Степень разработанности темы исследования**

Ученые и специалисты различных научных школ, занимающиеся вопросами возобновляемых источников энергии, внесли значительный вклад в развитие электротехнических систем с солнечными электростанциями. Вопросами повышения эффективности солнечных электростанций занимаются представители научных школ разных стран.

В России и в странах бывшего СССР значительный вклад в развитие солнечной энергетики внесли такие ученые как Абламович Б.Н., Бауман В.А., Ботнарюк В.М., Ванников А.В., Виссаринов В.И., Раушенбах Б.В., Позняк С.К., Попель О.С. и другие представители ФТИ имени А.В. Иоффе. Группа ученых во главе с Вологдиным С.В. занимаются вопросами оптимизации производства солнечной энергии. В работах Кувшинова В.В. рассматриваются вопросы энергетических характеристик и показателей преломления защитных покрытий фотоэлементов, хранением электрической энергии в солнечных электростанциях. В работах Коровкина Н.В. учитывается немаловажный факт проблемы старения и затенения фотоэлектрических панелей, который влияет на эффективность

преобразования солнечной энергии. Повышением эффективности солнечных электростанций за счет применения систем слежения за Солнцем занимается группа ученых Мажорова В.А. Однако, в работах рассматривается только один параметр, влияющий на выработку энергии – солнечное излучение.

Начиная с 2000 годов, системами слежения за Солнцем занимаются такие иностранные ученые как Koehl 2011, Kurtz 2009 Mattei 2006, и Markvart 2000. Однако, при моделировании теплового поведения фотоэлектрических систем принимают во внимание только два климатических параметра. С другой стороны, Skoplaki, при моделировании теплового поведения фотоэлектрических систем принимает во внимание только три климатических параметра – температура окружающей среды, солнечное излучение, скорость ветра. Однако, другие авторы, такие как F.C. Romero, принимают во внимание больше метеорологических факторов при прогнозировании теплового поведения фотоэлектрического модуля, таких как относительная влажность, атмосферное давление.

В работах этих учёных достаточно полно рассмотрены вопросы эффективности применения солнечных батарей. Однако к настоящему времени не решён ряд задач, касающихся их эксплуатации в специфических условиях, которые имеются в Республике Куба. К ним относятся как климатические, так и социально–экономические условия.

### **Соответствие паспорту специальности**

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы по пунктам: п.1 «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем»; п.3 «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления»; п.4 «Исследование работоспособности и качества функционирования

электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях».

**Объект исследования** – электротехнический комплекс на основе солнечной электростанции Сантьяго-де-Куба.

**Предмет исследований** – структура подстанции и алгоритм управления генерацией и потреблением электроэнергии.

**Цель работы** – повышение энергоэффективности работы электротехнического комплекса, содержащего солнечную электростанцию Сантьяго-де-Куба с учетом климатических, технологических и социально-экономических условий.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Проанализировать существующие подходы к формированию структуры электротехнического комплекса, содержащего солнечную электростанцию.

2. Определить комплекс климатических факторов, учитываемых при оценке величины генерируемой подстанцией энергией.

3. Осуществить факторный анализ климатических переменных для условий Республики Куба.

4. Разработать математические и компьютерные модели электротехнического комплекса, включающего солнечную электростанцию, позволяющие оценить величину генерируемой энергии в зависимости от ее структуры и параметров системы генерации.

5. Сформировать функцию, отражающую максимально возможное значение генерации электроэнергии в зависимости от ограничений по климатическим возможным техническим и социально– экономическим факторам.

6. Проверить адекватность разработанного подхода к проектированию электротехнического комплекса на компьютерной модели и экспериментально.

**Научная новизна:**

1. Сформированная факторная математическая модель генерируемой энергии, отличающаяся от известных введением дополнительных климатических показателей и основанная на выявленных зависимостях генерирования электроэнергии от вклада каждого из показателей.

2. Алгоритм выбора технических средств, входящих в состав солнечной электростанции, отличающийся учетом социально-экономических условий стран с развивающейся экономикой.

**Теоретическая и практическая значимость исследования:**

Теоретические решения, полученные в работе, могут быть использованы при реконструкции солнечной электростанции в Сантьяго-де-Куба, а также при проектировании новых подстанций при условии технических, климатических и социально-экономических ограничений, параметров нагрузки.

Результаты работы могут быть использованы в учебном процессе при реализации специальных образовательных программ.

**Методология и методы исследований**

Проведение исследований осуществлялось в соответствии с фундаментальными положениями теоретических основ электротехники, теоретических основ электроснабжения, теоретических основ солнечной энергетики, математического и имитационного моделирования процессов, а также с применением вычисления параметров моделей и обработки результатов, выполненных в программно-вычислительном комплексе Matlab/Simulink. Кроме того, в исследовании используется теория математического анализа.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Выбор климатических факторов, по которым моделируется значение генерируемой мощности электротехнического комплекса, включающего солнечную электростанцию, следует производить по

сформированной факторной модели, адекватность которой определяется путем ее оценки по коэффициенту детерминации, что повышает эффективность эксплуатации подстанции и качество электроэнергии, получаемой потребителем.

2. Обеспечение максимально возможной мощности солнечной электростанции при технических, климатических и социально-экономических ограничениях достигается с помощью разработанного алгоритма, в основу которого положена сформированная функция зависимости вырабатываемой подстанцией энергии от указанных ограничений.

**Степень достоверности результатов исследования** обусловлена использованием стандартных методов математического и имитационного моделирования. Адекватность методов, используемых в данной работе, подтверждается фундаментальными теориями исследования процессов генерации электроэнергии в солнечных электростанциях прямого преобразования, результатами экспериментальных исследований на электроподстанции Сантьяго-де-Куба, а также обсуждением основных результатов работы в рамках конференций и дискуссий по опубликованным статьям.

#### **Апробация результатов**

Основные положения и результаты работы докладывались следующих семинарах и конференциях: IV Всероссийская научно– практическая конференция «*Энергетика и энергосбережение: теория и практика*» – 2018, Кемерово, Россия; Международная научная конференции по электроэнергетике «*International Scientific Electric Power Conference ISEPC*» – 2019, Санкт– Петербург; VII Международная научно–практическая конференция «*Инновации и перспективы развития горного машиностроения IPDME*» – 2019, г. Санкт– Петербург; Международная научная конференция «*International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering EECE*» – 2019, г. Санкт– Петербург; VII Международная научно–

практическая конференция «*Инновации и перспективы развития горного машиностроения IPDME*» – 2020, г. Санкт– Петербург; XVI Международная научная конференция «*Форума–конкурса студентов и молодых ученых APN*» – 2020, г. Санкт– Петербург.

**Личный вклад автора** заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования; анализе работы солнечной электростанции Сантьяго-де-Куба; проведении математического и имитационного моделирования солнечной электростанции; разработке экспериментального стенда и проведении серии экспериментов, выявляющих эффективность систем слежения за Солнцем в различных условиях; обобщении и обработке экспериментальных данных; определении функции, отражающей максимально возможное значение генерации электроэнергии в зависимости от ограничений по климатическим возможным техническим и социально– экономическим факторам; формулировке основных научных положений и выводов, а также в подготовке текстов научных публикаций и апробации основных положений работы.

#### **Публикации по работе**

Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 8 печатных работах, в том числе в 4 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 4 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus; получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

### **Структура работы**

Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы и 2 приложений. Диссертация изложена на 138 страницах машинописного текста, в том числе содержит 38 таблиц и 63 рисунка. Список цитируемой литературы включает 130 источников.

# ГЛАВА 1 ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

## 1.1 Общая характеристика солнечной энергии

Солнечная энергетика - одно из направлений альтернативной энергетики, изучающее непосредственное использование солнечного излучения для получения других видов энергии. Солнечная энергетика является самым распространенным видом возобновляемой энергетики с минимальным воздействием на окружающую среду во время активной фазы ее использования.

По этим причинам необходимо глубоко изучить электротехнические комплексы с фотоэлектрическими системами, их эффективность и технические элементы, из которых они состоят, а также специфические экологические факторы каждого географического региона, которые напрямую влияют на эффективность этих систем.

Величина солнечного излучения на поверхности Земли зависит от географических координат, климатических и географических особенностей, состояния атмосферы, высоты Солнца над уровнем моря и т.д. Максимальный поток солнечного излучения на уровне моря на Экваторе равен  $1020 \text{ Вт/м}^2$ . Однако следует учитывать, что среднесуточное значение потока солнечного излучения меняется в большом диапазоне [2].

В зависимости от способа производства электроэнергии в установках, использующих солнечное излучение, области их применения (на поверхности Земли или в открытом космосе) может быть использован различный спектр излучения. На рисунке 1.1 представлено спектральное распределение солнечного излучения. Так как в работе рассматривается только «земное» применение фотоэлектрических систем, то только видимая часть спектра участвует в выработке электрической энергии. Однако следует отметить, что инфракрасное излучение также будет влиять на выработку электроэнергии, так как излучение этого спектра влияет на рабочую температуру панели. Зависимость выработки электроэнергии от рабочей температуры будет показана в дальнейшем.

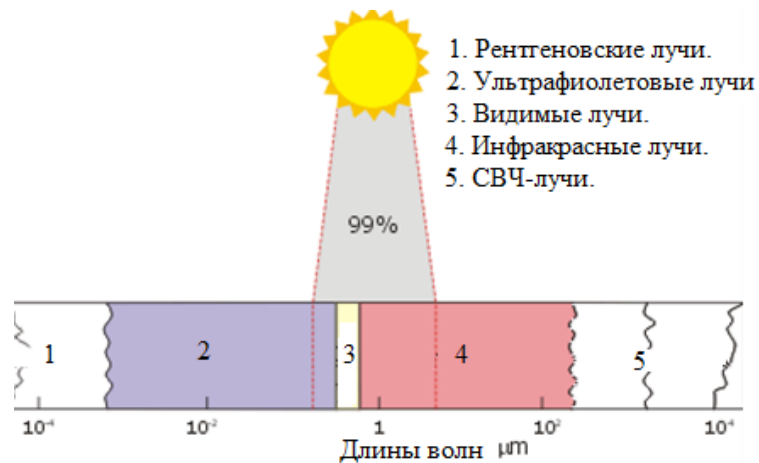


Рисунок 1.1 – Спектральное распределение солнечного излучения [27]

Солнечное излучение имеет свой пик пропускания в видимом диапазоне длин волн [от 0,38 до 0,78 микрометра ( $\mu\text{m}$ )] электромагнитного спектра (см. рисунок 1.1). Солнце также испускает значительное количество энергии в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра.

Иррадиацией («приход солнечной радиации») называется суммарное количество энергии и характеризует мощность солнечного излучения. Единицей измерения иррадиации является  $\text{Втч}/\text{м}^2$  в день, или другой период [4]. Величину иррадиации необходимо знать для расчета энергии, вырабатываемой фотоэлектрической установкой. Солнечное излучение, достигшее поверхности Земли включает в себя следующие компоненты (см. рисунок 1.2).

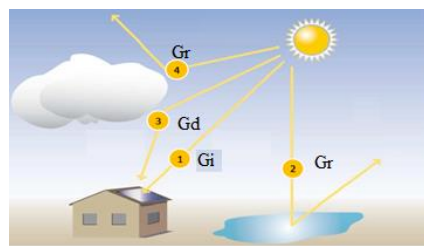


Рисунок 1.2 – Компоненты солнечного излучения на поверхности Земли, 1.  $G_i$  – Прямое солнечное излучение, 2.  $G_r$  – Отраженное солнечное излучение 3.  $G_d$  – Рассеянное солнечное излучение [34]

В данном разделе представлены основные физические характеристики, составляющие солнечное излучение, описано движение Солнца по небосводу в разное время года (расчеты солнечного пути представлены в разделе 2.2),

основные показатели солнечного излучения (расчёты составляющих прямого рассеянного солнечного излучения приведены в разделе 2.2), а также доступная мощность солнечной энергии. Все эти характеристики имеют значимость для данной работы, так как они будут использованы в дальнейших исследованиях.

## **1.2 Основные характеристики фотоэлементов**

Одним из основных наиболее распространенных материалов, используемых в конструкции солнечных элементов, является кремний, который при специальной химической обработке становится полупроводниковым материалом, что является наиболее важным физическим свойством солнечных элементов. Изучение физического и химического состава полупроводников необходимо для понимания фотоэлектрического эффекта.

Сегодня существует несколько видов солнечных элементов, из которых состоят солнечные батареи. Различия этих модулей в технологии и материалах, применяемых в их изготовлении. На данный момент существуют три типа батарей, разделяемых по материалу основы элемента - пленочные, кремниевые и аморфные.

### **1.2.1 Структура солнечного модуля**

Структура солнечного фотоэлектрического модуля заключается в совокупности множества отдельных солнечных фотоэлектрических элементов (СЭ), так называемых ячеек. Все СЭ в зависимости от требуемых выходных значений тока и напряжения соединяются последовательно и параллельно. Согласно [6] солнечный фотоэлектрический элемент (*solar photovoltaic cell*) - это элемент, преобразующий энергию солнечного излучения в электрическую энергию на основании внутреннего фотоэффекта.

На выходные параметры влияют величина солнечного излучения и температура. Напряжение на выходе СЭ зависит от температуры, в то время как ток на выходе зависит от интенсивности солнечного излучения. При увеличении интенсивности светового потока в 2 раза ток короткого замыкания СЭ увеличивается в 2 раза, в то время как напряжение холостого хода изменяется

незначительно. Так называемый температурный коэффициент учитывает разницу температур и равен порядка нескольких миллиампер на один градус Цельсия.

Солнечный элемент является основным строительным блоком фотоэлектрической системы. Отдельная ячейка обычно довольно мала и вырабатывает мощность порядка 1 или 2 Вт. Для увеличения выходной мощности солнечных ячеек, они должны быть соединены вместе, чтобы сформировать более крупные секции, называемые модулями. Модули, в свою очередь, могут быть соединены в более крупные единицы, называемые массивами, которые могут быть связаны между собой для увеличения мощности. При последовательном соединении ячеек или модулей выходное напряжение может быть увеличено. С другой стороны, для достижения большего значения выходного тока, ячейки или модули необходимо подключить параллельно (см. рисунок 1.2.1.1).

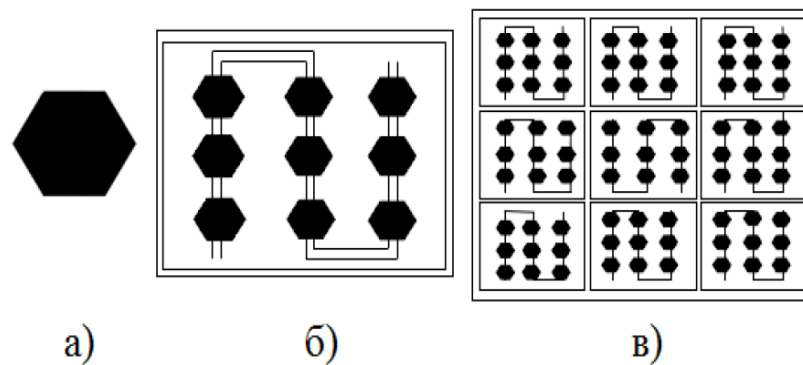


Рисунок 1.2.1.1 – а) Солнечная ячейка, б) Солнечный модуль, в) Солнечная батарея [90]

Изображение вольт– амперной кривой солнечного модуля показано на рисунке 1.2.1.2, которая предоставляет всю электрическую информацию о работе фотоэлектрического модуля.

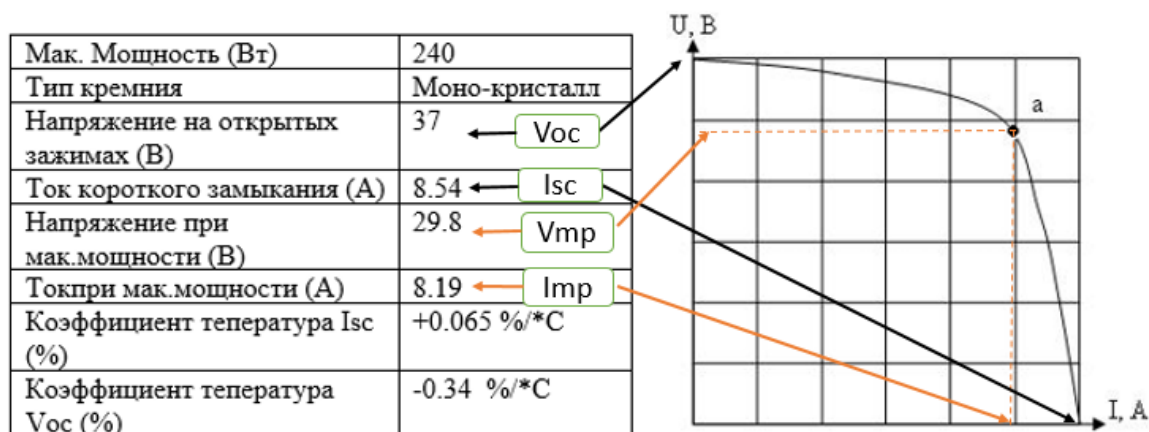


Рисунок 1.2.1.2 – Вольт– амперная характеристика солнечного модуля

где:  $I_{sc}$  – ток короткого замыкания при нормальных условиях работы (СТУ) (А),  $V_{oc}$  – напряжение разомкнутой цепи при стандартном тестовом условии (СТУ) (В).

Математическая модель фотоэлектрического элемента строится на основе классической эквивалентной схемы замещения с сосредоточенными параметрами, включающей в себя генератор фототока, диод, шунтирующее сопротивление ( $R_{sh}$ ), последовательное ( $R_s$ ) сопротивление [87]. Для того, чтобы получить удовлетворительную точность модели, необходимо иметь заданные значения внутренних сопротивлений фотоэлементов. В разделе 2.2.1 эта тема будет раскрыта более подробно.

Сегодня развитие технологий обеспечивает появление значительных вариаций фотоэлектрических батарей. И будет появляться ещё, потому что технологии не стоят на месте. На рисунке 1.2.1.3 представлены основные типы солнечных модулей [87].

Самыми распространенными сегодня солнечными модулями являются: монокристаллические (КПД до 25%), поликристаллические (КПД до 20%) и модули из аморфного кремния (КПД не более 9%). По стоимости производства самыми дорогими являются монокристаллические, затем идут поликристаллические и самыми недорогими являются модули из аморфного кремния.



Рисунок 1.2.1.3 – Типы солнечных модулей, наиболее используемых сегодня [49]

На рисунке 1.2.1.4 показано исследование, проведенное EnergyTrend в 2018 году, в котором показано сравнение существующих типов технологий и их эффективности.



#### Различные типы солнечных батарей

Рисунок 1.2.1.4 – График эффективности солнечных элементов и мощности панелей в зависимости от используемой технологии [37]

Изучение различных частей, составляющих фотоэлектрический модуль, а также их электрических характеристик, является важным шагом в проведении математического моделирования в программе Matlab. Это позволит лучше понимать зависимость электрических переменных от климатических параметров (таких как температура окружающей среды, солнечное излучение, скорость ветра

и др.), воздействию которых подвергается солнечный модуль. В разделе 2.2.1 будет изучена эта тема.

### **1.2.2 Электротехнические комплексы с солнечными фотоэлементами**

Существует несколько вариантов типовых солнечных электростанций. Принцип их функционирования зависит от технологии получения электрической энергии из солнечного излучения. Наиболее распространенными являются фототермические и фотоэлектрические установки. Следовательно необходимо рассмотреть все виды преобразователей, изучить принципы их работы, их особенности и технические параметры, для того чтобы выделить максимально производительные установки или же установки с наибольшей величиной КПД в процессе преобразования солнечного излучения в электричество.

Необходимо изучить наиболее известные современные технологии, выделить их преимущества и недостатки, для того чтобы понимать технологические процессы, связанные с улавливанием солнечных лучей и преобразованием солнечного излучения в другие виды энергии.

Солнечную энергию можно преобразовывать в другие виды энергии различными способами. Современные технологии включают параболические концентраторы, солнечные параболические зеркала и гелиоэнергетические установки башенного типа [37]. Существуют и другие типы солнечных установок, в этом разделе будут упомянуты наиболее часто используемые.

**Солнечные параболические концентраторы:** В настоящее время солнечные системы с параболическими концентраторами (см. рисунок 1.2.2.1) являются наиболее распространенным видом солнечных электростанций. Данная технология является наиболее экономически затратной, так как для нее характерна низкая концентрация солнечного излучения.

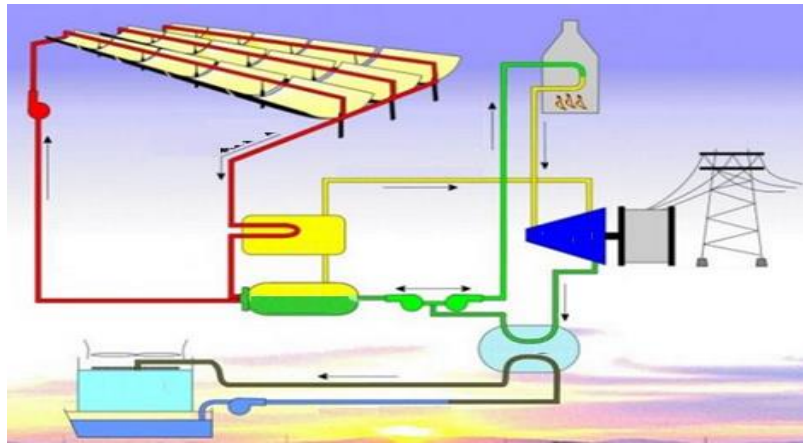


Рисунок 1.2.2.1– Параболические концентраторы солнечного излучения [69]

**Солнечные электростанции башенного типа:** Такие электростанции (см. рисунок 1.2.2.2) служат для производства электрической энергии в крупных масштабах. Отличительной особенностью данной технологии является применение гелиостатов.

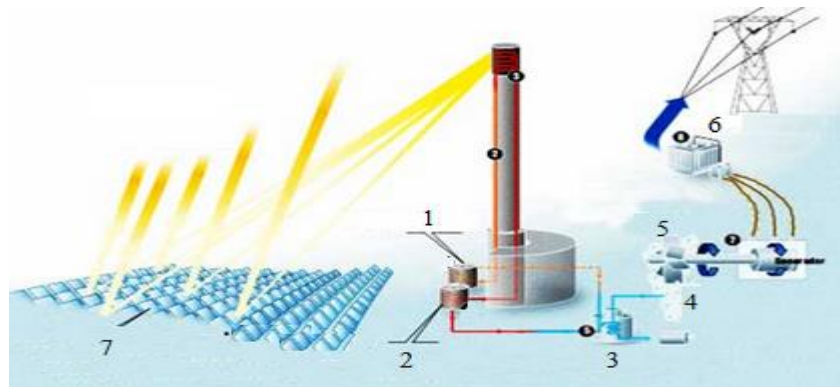


Рисунок 1.2.2.2 – Солнечная электростанция башенного типа. 1– Холодные соли, 2– Горячие соли, 3– Теплообменник, 4– Водяной пар, 5– Турбина, 6– трансформатор [70]

**Солнечные фотоэлектростанции (ФЭС):** Основным компонентом ФЭС является ФЭМ, отвечающий за прямое преобразование солнечной энергии в электрическую [ГОСТ 51594– 2000] . В зависимости от мощности ФЭС и способа подключения к сети могут включать в свой компонентный состав – аккумуляторные батареи, преобразователи, контроллеры и другие составляющие. Такие установки предназначены для получения электроэнергии из солнечных лучей с ее последующим резервированием или подачей в сеть [70].

На рисунке 1.2.2.3 представлена наиболее распространенная структурная схема ФЭС – автономного энергообеспечения объекта. Другие варианты схем предполагают коммутацию ФЭС с сетью и/или параллельную работу ФЭС с другим источником электропитания.

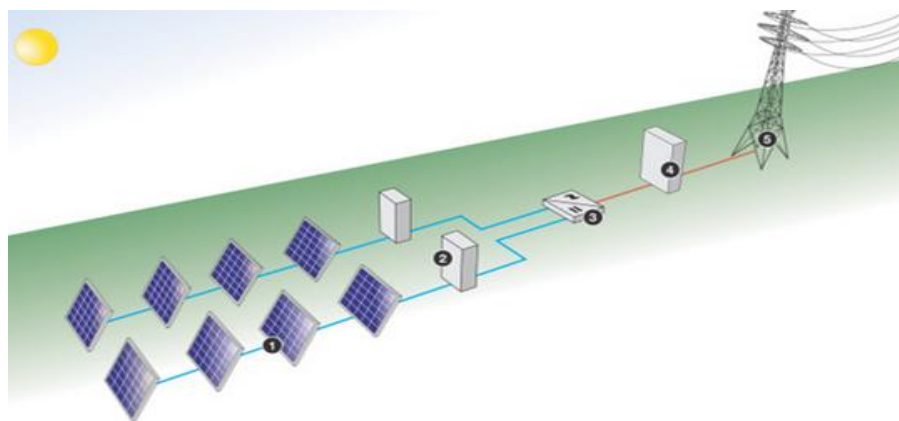


Рисунок 1.2.2.3 – Солнечная электростанция (ФЭС), 1– фотоэлектрический генератор, 2– Электрический щит CD, 3– Инвертор, 4– Электрический щит СА, 5– электрическая сеть автономного объекта [13]

Преимуществом ФЭС является минимальное обслуживание и редкий ремонт. Современные солнечные панели способны вырабатывать электроэнергию даже в условиях короткого светового дня, и малой солнечной активности.

### 1.2.3 Солнечные электростанции с солнечным трекингом

Плоские фотоэлектрические модули (ФЭМ), применимые на поверхности Земли, преобразуют прямое и рассеянное солнечное излучение в видимой части спектра. ФЭМ генерируют электроэнергию независимо от ориентации их поверхности на Солнце, однако, с разной эффективностью, поэтому для максимизации электрической энергии, получаемой от прямой составляющей солнечного излучения, применяются системы слежения за Солнцем [13].

Солнечные трекеры начали применяться, когда фотоэлектрические системы стала использоваться для генерации большого количества электроэнергии. Прежде всего, они используются при условии большой площади поверхности ФЭМ (полей), так как таким образом увеличивается производство электроэнергии

фотоэлектрическими панелями на счет того, что панели всегда располагаются максимально перпендикулярно к солнечным лучам.

В настоящее время существуют различные технологии, применяемые для разработки систем слежения за Солнцем, которые гарантируют повышение эффективности улавливания солнечных лучей. Это приводит к увеличению выработки электрической энергии всем комплексом. Далее будет рассмотрено два типа систем слежения за Солнцем: – одно – и двухосевые трекеры.

На рисунке 1.2.3.1 показаны различные модели, разработанные разными производителями.

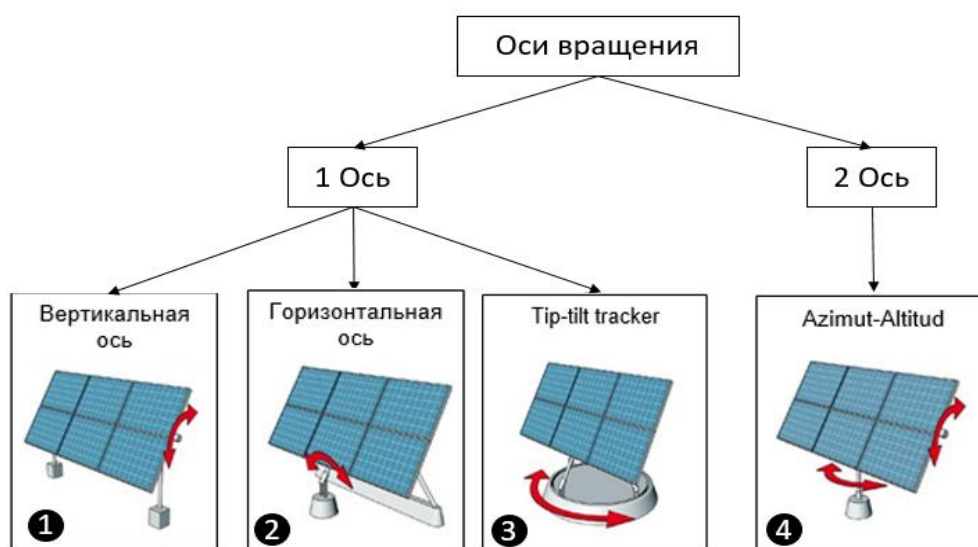


Рисунок 1.2.3.1 – Типы систем слежения за солнцем

Страны, в основном из Северной Америки и Европы, способствовали исследованиям и разработке фотоэлектрических генераторов, а также солнечных трекеров. В рамках проведенных исследований системы слежения были оценены с точки зрения их соотношения затрат и выгод в процессе фотоэлектрической генерации, и сообщается об увеличении генерации до 35% в отношении использования фиксированных панелей из-за того, что у этих последователей две оси, фотоэлектрические модули всегда перпендикулярны Солнцу.

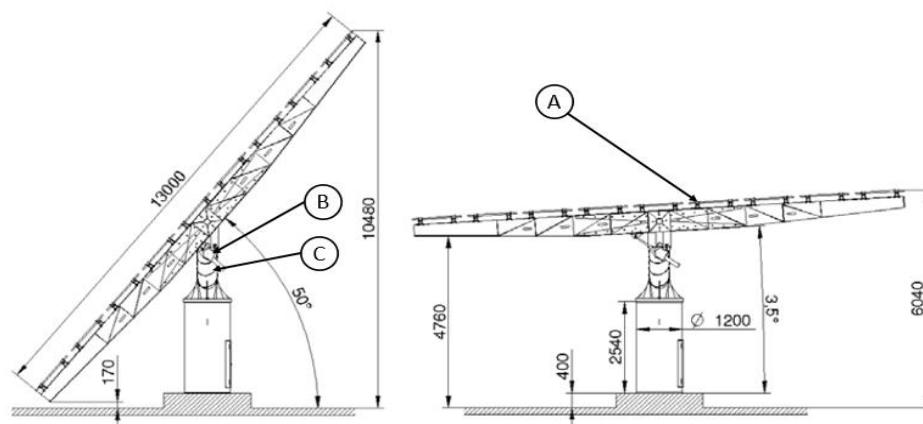


Рисунок 1.2.3.2 – Части и компоненты двухосевого солнечного трекера  
(Двухосевой трекер 30 кВт) [64]

На рисунке 1.2.3.2 показаны основные части, составляющие солнечный трекер с двумя осями, где А – фотогальванический генератор, состоящий из соединенных солнечных панелей, точка В показывает двигатель, отвечающий за движение по пути, который описывает Солнце, а в точке С – двигатель, который управляет высотой, так что облучение принимается перпендикулярно в любое время года. Угол возвышения составляет от 15 до 90°, а скорость вращения 0,52–0,62°/s.

В настоящее время на международном рынке существуют различные производители и модели солнечных трекеров. В таблице 1.1 приведены некоторые примеры текущих затрат на эти системы в зависимости от их модели [20]. Данные, представленные в таблице 1.1, соответствуют данным на июнь месяц 2020 года.

Таблица 1.1 – Затраты на международном рынке солнечных трекеров по моделям

| Типы | Стоимость  | *Эффективность |
|------|--|----------------|
| 1    | \$ 0.08 ВА – \$ 0.14 ВА                              | С 10% до 25 %  |
| 2    | \$ 0.08 ВА – \$ 0.14 ВА                              | С 10% до 25 %  |
| 3    | ---  | С 10 % до 20%  |
| 4    | \$ 0.19 ВА – \$ 0.25 ВА<br>\$ 0.40 ВА – \$ 0.50 ВА** | С 30% до 45%   |

\* Эффективность солнечных систем слежения по сравнению с немобильными системами.

\*\* Двухосные солнечные системы слежения с GPS. (GPS– спутниковая система навигации)

Основными производителями солнечных трекеров являются такие компании как: NEXTracker, ArrayTechnologies, PV Hardware, ArctechSolar, Soltec, NClave, ConvertItalia, STiNorland, GameChangeSolar, SunPower. Компания NEXTracker лидирует в рейтинге производителей фотоэлектрических трекеров на мировом рынке. Поставки данной компании на сегодняшний день составляют 29% от общего объема поставок солнечных трекеров. Вторым крупным производителем последние два года является компания ArrayTechnologies, далее идут испанские PV Hardware (PVH), ArctechSolar и Soltec занимает пятое место в данном рейтинге.

Уравнения для определения эффективности систем мониторинга по сравнению со стационарными системами:

$$Gan = \frac{E_{dm} - E_{df}}{E_{df}} * 100, \quad (1.1)$$

где:  $E_{dm}$  – Электроэнергия доставляемая мобильной системой,  $E_{df}$  – Электроэнергия стационарной системы,  $Gan$  – прирост энергии.

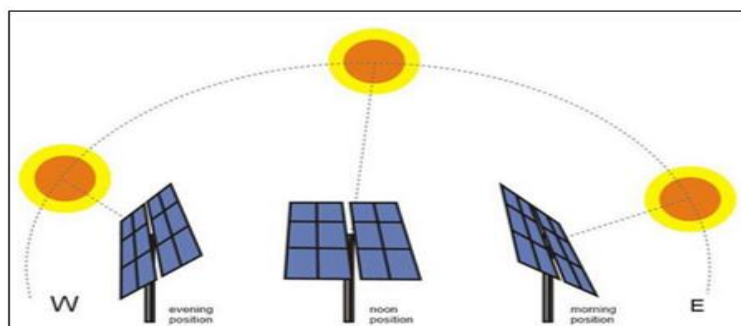


Рисунок 1.2.3.3 – Солнечная система слежения [20]

Углы, которые определяют движение солнечного трекера в горизонтальном движении ( $\alpha$ ) и вертикальном движении ( $\gamma$ ), равны [88]:

$$\alpha = \text{sen}^{-1}(\cos(\varphi) * \cos(\delta) * \cos(w) + \sin(\delta) * \sin(\varphi)), \quad (1.2)$$

$$\gamma = \text{tan}^{-1}\left(\frac{\text{sen}(w)}{\text{tan}(\delta) * \cos(\varphi) - \sin(\varphi) * \cos(w)}\right), \quad (1.3)$$

где:  $\delta$ – Угол солнечного склонения ( $^{\circ}\text{F}$ );  $w$ – Угол солнечного времени ( $^{\circ}\text{F}$ );  $\alpha$ – Солнечный угол высоты ( $^{\circ}\text{F}$ );  $\gamma$ – Угол Азимут ( $^{\circ}\text{F}$ );  $\varphi$  – Географическая широта места ( $^{\circ}\text{F}$ ).

Изучение различных технологий солнечных электростанций, существующих в настоящее время, дает достаточную информацию, необходимую для понимания различных конструкций и компонентов, составляющих эти системы. Необходимо знать параметры каждого из электрических и механических элементов, так как данная информация влияет на принятие технических решений, которые позволяют инженерам и техникам ремонтировать их в случае сбоев, а также повышать их эффективность, обеспечивать техническое обслуживание и продлевать срок службы комплексов.

В данном разделе рассмотрены основные параметры солнечных трекеров, типы существующих солнечных трекеров и текущие значения коммерциализации на международном рынке. Основные характеристики производства электроэнергии солнечными электростанциями в Республике Куба.

В настоящее время на Кубе существует 10 заводов, которые имеют электростанции для выработки электроэнергии общей установленной электрической мощностью 2.5 ГВт. Около половины всех энергообъектов Кубы было построено при полном или частичном содействии СССР, а впоследствии и России. Помимо 10 термоэлектростанций, в стране до 2017 года было 1405 генераторных установок (855 дизельных групп и 550 групп Fuel).

Солнечная энергия представляется как эффективная и экономичная альтернатива по сравнению с другими традиционными формами производства электрической энергии. Все это увеличило потребность в более широком использовании солнечной энергии. В любом случае, первое условие, которому должна соответствовать система использования солнечной энергии, – это сбор как можно большего количества энергии в данном месте.

Сегодня научное и инженерное сообщество Республики Куба ищет альтернативы ископаемым видам топлива, для которых она использует

возобновляемые источники энергии. В Республике Куба в 16 провинциях страны, в период 2014– 2017 гг в систему энергоснабжения страны были введены 40 солнечных электростанций (ФЭС) общей мощностью 160 МВт.

Однако во многих из этих фотоэлектрических установок (ФЭС) в стране ожидаемые уровни энергии не производятся в соответствии с оценками, полученными проектными компаниями. Основной причиной такой разности между проектными данными и реальными, является низкая эффективность компонентов, которые входят в состав ФЭС.

Согласно исследованиям, проведенным CIES при оценке электрических параметров в группе солнечных панелей (100 единиц) фотоэлектрических генераторов солнечной электростанции мощностью 2,5 МВт в Сантьяго-де-Куба, было обнаружено, что солнечные панели имеют среднее отклонение мощности – 8 %, когда производитель этих солнечных модулей в данных указал  $\pm 3\%$ .

Солнечная электростанция мощностью 2,5 МВт имеет 10400 солнечных панелей 240 Вт с номинальным отклонением мощности  $\pm 3\%$  и, согласно результатам исследования CIES, среднее отклонение мощности солнечных панелей составляет – 8 %, Это означает, что реальная мощность солнечного генератора на электростанции 2,5 МВт в Сантьяго-де-Куба ограничена 2,3 МВт, что примерно на 20 кВт меньше из- за этой проблемы.

Однако, эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую, на данный момент, находится на низком уровне. Стоимость производства электроэнергии с помощью ФЭС очень высока, однако в последние годы наблюдается тенденция снижения стоимости. Основными причинами сложившейся тенденции являются:

1. Устаревшие модели солнечных батарей и технологии, используемые в электротехнических комплексах.
2. Отсутствие системы управления, учитывающей изменение таких факторов как солнечная активность в различное время года и

климатические условия (относительная влажность, атмосферное давление, а также температура окружающей среды, и солнечное излучение) и изменение положения Солнца в течение дня.

### 3. Социально– экономические условия в Республике Куба, ограничивающие развитие солнечной энергетики.

Широко распространены два пути максимизации электроэнергии, получаемой от фотоэлектрической установки: улучшение структуры фотоэлектрической панели, направленное на повышение ее производительности; увеличение количества улавливаемого панелью солнечного излучения. Для достижения наилучшего результата при применении второго способа площадь фотоэлектрической панели должна оставаться перпендикулярной излучению источника света. Для этого в фотоэлектрических системах используются системы слежения за солнцем. Сегодня, фотоэлектрические панели имеют типичный КПД между 12% и 25% и приблизительную производительность в диапазоне 120 - 420 Вт/м<sup>2</sup> в зависимости от эффективности фотоэлектрической панели.

Использование систем солнечного слежения на солнечной электростанции электрического комплекса позволит повысить надежность и эффективность получения электроэнергии.

С учетом сказанного выше целью данной диссертационной работы является повышение производства электроэнергии, вырабатываемой с помощью ФЭС в Республике Куба с применением систем слежения и с учётом климатических и социально– экономических условий для повышения качества электроэнергии ее потребителей.

Региональное развитие-это процесс структурных социально– экономических и экологических изменений, основной целью которого является улучшение благосостояния населения территории и сокращение социального и экономического неравенства в рамках подхода устойчивости; Это процесс, который включает расширение производственных, социокультурных и политических возможностей и возможностей общества.

### 1.2.4 Анализ исходных данных объекта для моделирования

Фотоэлектрические установки на солнечной энергии, подключенные к электрической сети-это установки, в которых генерируемая энергия напрямую поступает в электрическую сеть. Этот тип установки солнечной энергии работает как электростанция для производства электроэнергии.

Гидроэнергетическая компания, принадлежащая Министерству энергетики и горнодобывающей промышленности, отвечает за эксплуатацию и обслуживание солнечных электростанций на всей национальной территории Республики Куба.

Эта компания продает всю энергию, производимую солнечной электростанцией мощностью 2,5 МВт в провинции Сантьяго-де-Куба, электрической компании на этой же территории.

В настоящее время исследуемая фотоэлектрическая электростанция в провинции Сантьяго– де– Куба находится на 20,0 градуса северной широты и 75,8 градуса западной долготы. Эти координаты соответствуют району Абель Сантамария муниципалитета Сантьяго-де-Куба, в 18 км к востоку от города Сантьяго-де-Куба, в Республике Куба. На рисунке 1.3.1 показаны принципиальная схема электротехнического комплекса (а) и вид сверху (б).



Рисунок 1.3.1 – ФЭС в провинции Сантьяго-де-Куба, в Республике Куба

Где точки на рисунке 1.3.1 (б) представляют различные элементы, которые составляют эту электростанцию как:

1. Солнечный генератор (марка NUM SOLAR, модель ДСМ-240-С).
2. Панели электрических соединений между генератором и инвертором (ПК).
3. Трехфазные инверторы (Бренд: SUNNY TRIPOWER, Модель 17000TL).
4. Общая панель распределения (PGD).
5. Трехфазные трансформаторы.
6. Редукционная основная подстанция (ППР).

В настоящее время фотоэлектрическая электростанция в провинции Сантьяго-де-Куба, Республика Куба, вырабатывает около 3,3 Гтч электроэнергии в год в национальную сеть, что соответствует установленной мощности, распределенной между двумя подстанциями, с двумя видимыми силовыми трансформаторами 1,25 МВА, в общей сложности 2,5 МВт. С помощью электросети длиной 1 км, система соединяется с национальной электроэнергетической системой. На разделе 2.2.1 показаны этапы производства электроэнергии на фотоэлектрической электростанции в провинции Сантьяго-де-Куба.

Фотоэлектрическая электростанция Сантьяго-де-Куба в настоящее время имеет 10400 фотоэлектрических панелей (ДСМ-240-С), соединенных последовательно и параллельно, для того чтобы образовать ряды солнечных панелей, которые составляют солнечный генератор станции. Каждая секция солнечного генератора (всего 130) состоит из 4 параллельных струн из 20 солнечных панелей, соединенных последовательно.

### **1.3 Анализ публикаций по вопросам прогнозирования производства энергии и работы солнечных комплексов.**

Ученые и специалисты различных научных школ, занимающиеся вопросами возобновляемых источников энергии, внесли значительный вклад в развитие различных электротехнических систем с солнечными электростанциями. В 1839

году французский физик Александр Эдмунд Бекерель открыл фотоэлектрический эффект, в результате которого возникли фотоэлектрические элементы. Александр обнаружил, экспериментируя с батареями из гальванического материала, что напряжение увеличивается при наличии солнечного излучения. Несмотря на это, он не мог объяснить это явление в то время, но именно Альберт Эйнштейн открыл физическую основу фотоэлектрического эффекта в 1905 году [21].

Предшественники сегодняшних фотоэлектрических панелей были разработаны Чарльзом Фриттсом в 1883 году. Именно он заложил основы будущих исследований фотоэлектрического эффекта. Солнечные элементы на основе кремния относительно новы. В 1954 году группа лабораторий Bell Corporation (США) совместно со специалистами Кэлвином Фуллером, Дэрилом Чапином и Джеральдом Пирсоном разработала первый солнечный элемент с КПД 6%. Следующие разработки фотоэлектрических панелей также тесно связаны с космической техникой.

В работах этих учёных достаточно полно рассмотрены вопросы эффективности применения солнечных батарей. Однако к настоящему времени не решён ряд задач, касающихся их эксплуатации в специфических условиях, какие имеются в Республике Куба. К ним относятся как климатические условия, так и социально-экономические. Отсюда следует цель работы.

В обновленной библиографии научных работ, статей и публикаций было подтверждено, что многие авторы, такие как Koehl 2011, Kurtz 2009, Markvart 2000 и Mattei 2006 [60], при моделировании теплового поведения фотоэлектрических систем принимают во внимание только два климатических параметра, такие как температуру окружающей среды и скорость ветра с помощью приближенного уравнения. С другой стороны, Skoplaki [60], при моделировании теплового поведения фотоэлектрических систем принимают во внимание только три климатических параметра-температура окружающей среды, солнечное излучение, скорость ветра.

Однако другие авторы, такие как F.C. Romero, принимают во внимание больше метеорологических факторов при прогнозировании теплового поведения фотоэлектрического модуля, таких как относительная влажность, атмосферное давление, а также температура окружающей среды, и солнечное излучение, которые являются более сложными тепловыми моделями.

Таким образом, это исследование определит, какой из метеорологических факторов имеет наибольшее влияние на рабочую температуру фотоэлектрического модуля с помощью экспериментов и математических моделей.

После определения основных метеорологических факторов и электрических параметров, влияющих на эффективность солнечного модуля на фотоэлектрической станции в провинции Сантиаго-де-Куба, будет проведена техническая диагностика решить проблему низкого КПД генераторов данной установки. В предыдущем разделе было упомянуто, что есть два основных метода увеличения производства солнечной энергии от фотоэлектрических генераторов.

Первый способ напрямую связан с разработкой новых технологических решений создания материалов и комбинирования различных полупроводниковых материалов, способных улавливать различный спектр. Например, в работе повышение КПД фотоэлектрического модуля достигается путем создания многослойных панелей, так называемых гетероструктур. Данной технологией активно занимаются в физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН. В работе описано применение тонких пленок для двухсторонних кремниевых солнечных элементов.

#### 1.4 Цели и задачи научно– квалификационной работы

Целью работы является повышение эффективности работы электротехнического комплекса, содержащего солнечную электростанцию Сантьяго-де-Куба с учетом климатических, технологических и социально-экономических условий.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Проанализировать существующие подходы к формированию структуры электротехнического комплекса, содержащего солнечную электростанцию.
2. Определить комплекс климатических факторов, учитываемых при оценке величины генерируемой подстанцией энергией;
3. Осуществить факторный анализ климатических переменных для условий Республики Куба.
4. Разработать математические и компьютерные модели электротехнического комплекса, включающего солнечную электростанцию, позволяющие оценить величину генерируемой энергии в зависимости от ее структуры и параметров системы генерации.
5. Сформировать функцию, отражающую максимально возможное значение генерации электроэнергии в зависимости от ограничений по климатическим возможным техническим и социально–экономическим факторам.
6. Проверить адекватность разработанного подхода к проектированию электротехнического комплекса на компьютерной модели и экспериментально.

## 1.5 Выводы по первой главе

Солнечное излучение, достигшее поверхности Земли, зависит от многих факторов. В первую очередь от широты и долготы местности. Кроме того, значение солнечной радиации зависит от климатических и географических особенностей, состояния атмосферы, высоты Солнца над уровнем моря и т.д.

В следующих главах этой исследовательской работы будет проанализировано влияние климатических факторов, влияющих на эффективность производства электроэнергии, поставляемой солнечными системами.

Факторы климатических условий (см. рисунок 1.7) можно представить следующим образом:

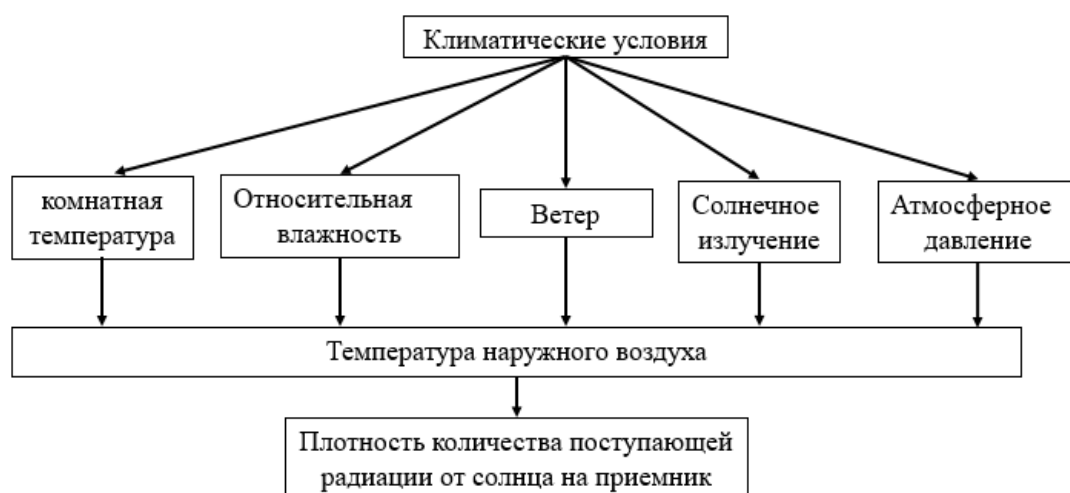


Рисунок 1.7 – Факторы климатических условий

Солнечные электростанции, которые работают в провинции Сантьяго-де-Куба, в Республике Куба, на текущем этапе развития должны реорганизовать технологические процессы за счет использования современного оборудования, схем подключения, а также методов, соответствующих требованиям энергоэффективности.

Проблема низкого КПД солнечных генераторов этих солнечных электростанций имеет большое значение как для специалистов, так и для инженеров в области возобновляемых источников в Республике Куба.

Использование более эффективных фотоэлектрических элементов или систем слежения за солнечными батареями в солнечной электростанции электрического комплекса повысит надежность, эффективность и производство энергии в регионе.

Но есть ряд задач, которые необходимо выполнить для повышения электрического КПД солнечных генераторов фотоэлектрической станции мощностью 2,5 МВт в провинции Сантьяго-де-Куба в Республике Куба.

## **ГЛАВА 2 АНАЛИЗ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТАВЛЯЮЩИХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

В главе 1 были проанализированы климатические факторы, которые в определенных условиях следует учитывать при оценке эффективности использования солнечных электростанций. Максимальное количество факторов равно пяти. Однако не определена их относительная значимость для условия Республики Куба. С этой целью в настоящей главе рассматриваются климатические условия Кубы по всем пяти факторам, а также математические модели элементов солнечной электростанции, которые позволят оценить относительную значимость каждого фактора.

### **2.1 Климатические условия**

Для дальнейшего анализа значимости выявленных факторов, влияющих на эффективность работы солнечной электростанции, необходимо провести анализ их характеристик. Следует отметить, что к указанным факторам относятся: солнечное излучение, влажность, давление, температура окружающей среды и скорость ветра.

#### **2.1.1 Солнечное излучение**

Для оценки возможности использования солнечной энергии и эффективность использования, необходимо проводить комплексный анализ данных о суммарной солнечной энергии в том или ином регионе. Для этого необходимо провести исследования радиационного режима во времени, с последующей выработкой тепла либо электроэнергии гелиоустановкой за один месяц, сезон или за один год с дальнейшей оценкой ее технико–экономических показателей. Для анализа инсоляции используют уже имеющиеся данные в режиме реального времени с помощью глобальных спутниковых систем, климатические атласы, а также полевые замеры солнечной радиации непосредственно на объекте исследования.

Как известно, величина солнечного излучения зависит от широты и меняется от  $6.5 \text{ кВтч/м}^2$  на экваторе до  $4 \text{ кВтч/м}^2$  на полюсе. На рисунке 2.1.1.1 показана интенсивность солнечного излучения на территории Кубы по средствам моделирования SUNY, программы которая обладает высоким пространственным разрешением ( $1 \times 1 \text{ км}$ ) и получена со спутниковых изображений.



Рисунок 2.1.1.1 – Интенсивность инсоляции на территории Куба [40]

Величина солнечного излучения, которое приходится на горизонтальную поверхность площадью  $1 \text{ м}^2$ , в некоторых регионах Республики Куба в летние месяцы составляет в среднем  $6 \text{ кВтч/м}^2$  (см. рисунок 2.1.1.2).

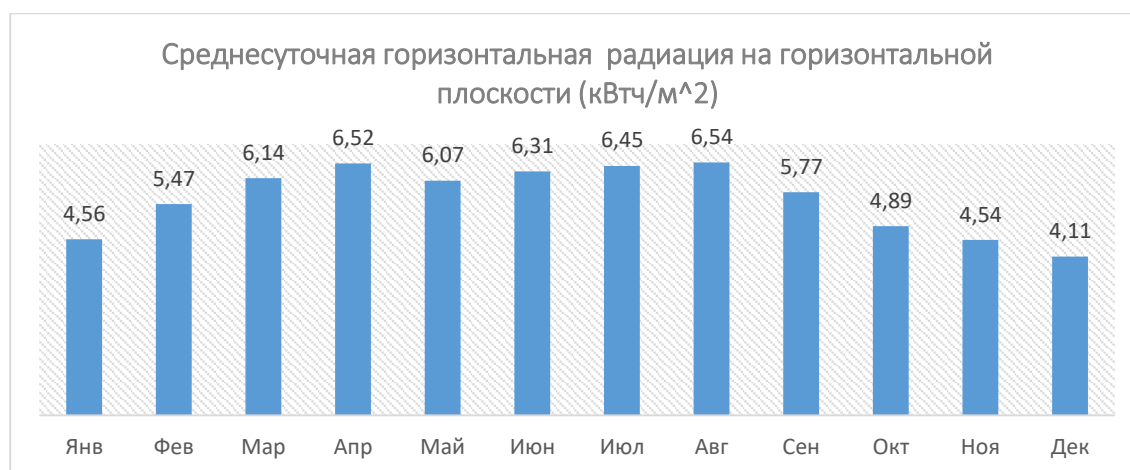


Рисунок 2.1.1.2 – Среднесуточная горизонтальная радиация в горизонтальной плоскости ( $\text{кВтч/м}^2$ ) на территории Сантьяго де Куба (широты  $20.02^\circ\text{N}$  и долготы  $75.82^\circ\text{O}$ ), измеренных в период с 2010 по 2020 год (10 лет)

Среднесуточные данные о солнечной радиации для территории Сантьяго де Куба могут достигать абсолютных минимальных значений  $4 \text{ кВтч/м}^2$  и абсолютных максимальных значений  $6,5 \text{ кВтч/м}^2$ .

На рисунке 2.1.1.3 показано изменение количества часов солнечного света в день для исследуемого региона в провинции Сантьяго-де-Куба. Эта переменная важна для оценки солнечной энергии, получаемой в исследуемом регионе (см. таблицу А.1, Приложение А)

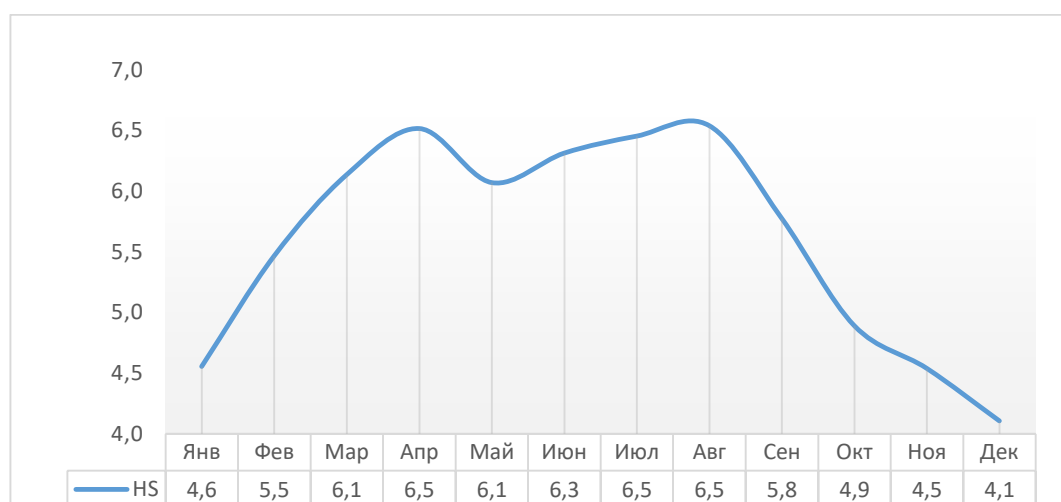


Рисунок 2.1.1.3 – Среднее количество часов солнечного света в провинции Сантьяго-де-Куба

Таким образом, был определен диапазон изменения инсоляции по месяцам. Полученные результаты будут использованы в дальнейших исследованиях.

### 2.1.2 Относительная влажность и давление

По данным центра NASA (*Prediction of worldwide energy resources*) [40] климатические значения средней относительной влажности и среднего атмосферного давления для каждого месяца для территории Сантьяго-де-Куба в Республике Куба показаны на рисунке 2.1.2.1 (см. таблицы А.2 и А.3, Приложение А).

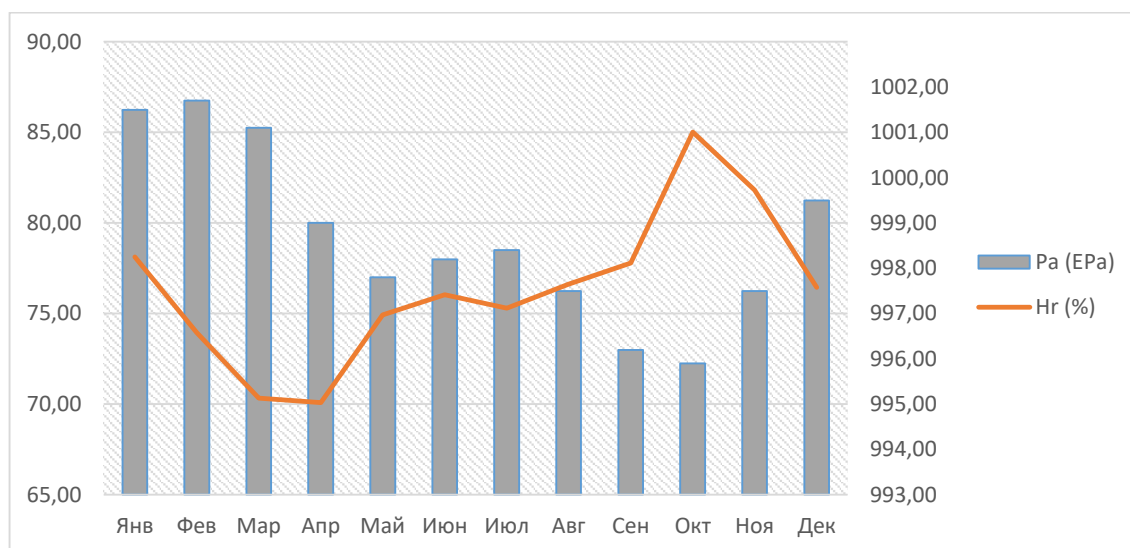


Рисунок 2.1.2.1 – Среднесуточная относительная влажность (ось Y слева) (%) и среднесуточное атмосферное давление (ось Y справа) (Па) на территории Сантьяго-де-Куба (широты 20.0208°N и долготы 75.8267°O) измеренных в период с 2010 по 2020 год (10 лет)

Среднемесячные данные относительной влажности на территории Сантьяго–де–Куба могут достигать минимальных абсолютных значений и достигать значения 50% и максимальных абсолютных значений в 95%. Данные о среднемесячном атмосферном давлении говорят о том, что абсолютные минимальные значения равны 975 Па и абсолютные максимальные значения равны 1002% Па.

Таким образом, был определен диапазон характерного изменения параметров влажности и давления.

### 2.1.3 Температура окружающей среды и скорость ветра

По данным центра NASA (Prediction of worldwide energy resources) [40] были получены климатические значения средней температуры окружающей среды и средней скорости ветра для каждого месяца для территории Сантьяго-де-Куба в Республике Куба. Результаты анализа представлены на рисунке 2.1.3.1 (см. таблицы А.4 и А.5, Приложение А) .

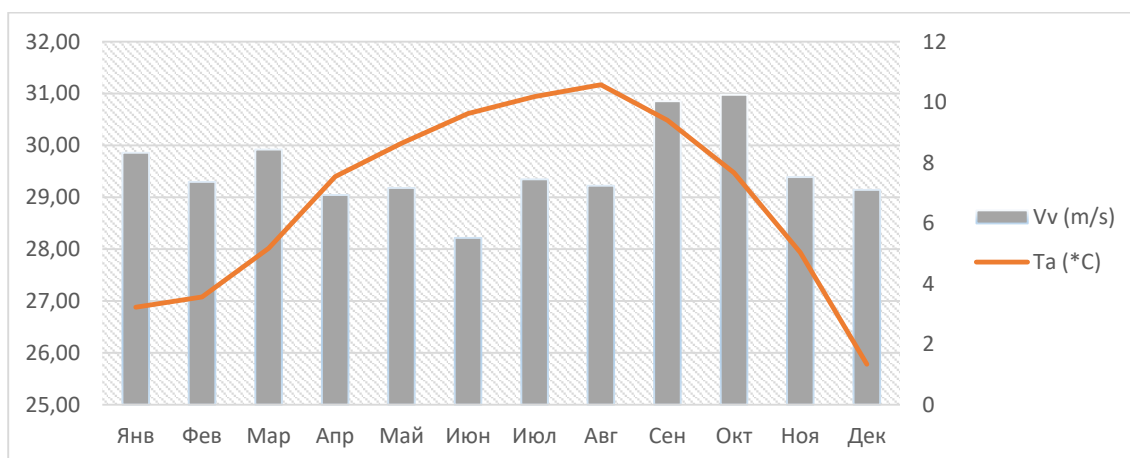


Рисунок 2.1.3.1 – Среднемесячная температура окружающей среды (ось Y слева) (°C) и среднемесячная скорость ветра (ось Y справа) (м/с) на территории Сантьяго де Куба (широты  $20.0208^{\circ}\text{N}$  и долготы  $75.8267^{\circ}\text{O}$ ) измеренных в период с 2010 по 2020 год (10 лет)

Данные о среднемесячной температуре окружающей среды в Сантьяго– де– Куба говорят о том, что абсолютное минимальное значение составляет  $18^{\circ}\text{C}$ , в то время как максимальная абсолютная температура равна  $32^{\circ}\text{C}$ . На основании анализа данных о среднемесячной скорости ветра получены значения минимальных значений  $0.5$  м/с и абсолютных максимальных значений  $10$  м/с.

Таким образом, в работе выявлены диапазоны характерных изменений по месяцам инсоляции, относительной влажности, давления, температуры окружающей среды и скорости ветра для условий Республики Куба. Очевидно, что выявленные параметры имеют свои отличительные особенности, что повлияет на ход дальнейших исследований.

## 2.2 Моделирование объекта исследования

Фотоэлектрические установки на солнечной энергии, подключенные к электрической сети-это установки, в которых генерируемая энергия напрямую поступает в электрическую сеть. Этот тип установки солнечных генераторов работает как электростанция для производства электроэнергии.

Основным недостатком систем, связанных с солнечной энергией, является то, что солнечные характеристики являются функцией падающего солнечного

излучения в каждый момент времени. Следовательно, зарегистрированные значения выработки электроэнергии будут варьироваться в зависимости от времени суток, времени года и погоды.

### 2.2.1 Формирование системы электроснабжения с использованием фотоэлектрической станции

Общий вид фотоэлектрической станции в провинции Сантьяго-де-Куба показан на рисунке 2.2.1.1. На рисунке показаны этапы производства электроэнергии на фотоэлектрической электростанции в провинции Сантьяго-де-Куба.



Рисунок 2.2.1.1 – Этапы генерации фотоэлектрической электростанции в провинции Сантьяго-де-Куба, в Республике Куба

Фотоэлектрическая электростанция Сантьяго-де-Куба в настоящее время имеет 10400 фотоэлектрических панелей (ДСМ-240-С), соединенных последовательно и параллельно, для того чтобы образовать ряды солнечных панелей, которые составляют солнечный генератор станции. Каждая секция солнечного генератора (всего 130) состоит из 4 параллельных струн из 20 солнечных панелей, соединенных последовательно.

На рисунке 2.2.1.2 показаны панели, используемые в фотоэлектрической электростанции, которые марки NUMEN SOLAR модели ДСМ-240-С, которые соединены между собой, позволяют вырабатывать электроэнергию. В таблице А.6

приведены технические параметры панелей с учетом излучения  $1000 \text{ Вт/м}^2$  и температуры окружающей среды  $25^\circ\text{C}$ .



Рисунок 2.2.1.2 – Фотоэлектрический генератор электростанции Сантьяго-де-Куба, в Республике Куба

Инверторы используются для преобразования постоянного тока от аккумуляторов или солнечных модулей в переменный ток.

В соединенных с сетью системах инверторы принимают энергию от солнечных модулей и преобразуют ее в переменный ток, которые подается в сеть. String инверторы предназначены для работы с несколькими модулями в одной или нескольких цепочках. Это наиболее распространенный тип сетевых инверторов.

Фотоэлектрическая электростанция Сантьяго-де-Куба, в Республике Куба, состоит из 130 фотоэлектрических преобразователей SUNNY TRIPOWER модели 17000TL, каждый из которых способен работать с номинальной мощностью около 17 кВА. На этом этапе постоянный ток, генерируемый солнечными батареями, преобразуется в переменный ток для передачи на трансформатор.

На рисунке 2.2.1.3 показан инвертор, используемый в фотоэлектрической системе. Технические характеристики инвертора (модуля 17000TL) представлены в таблице А.7 (Приложение А).



Рисунок 2.2.1.3 – Инвертор Sunny Tripower (модели 17000TL)

Типы инвертор на других объектах:

- a) Используется для установок мощностью более 10 кВт.
- b) Используется в установках средней мощности от 3 до 10 кВт .
- c) Используется в маломощных установках от 50 до 400 Вт.

На рисунке 2.2.1.4 показана схема подключения инвертора:

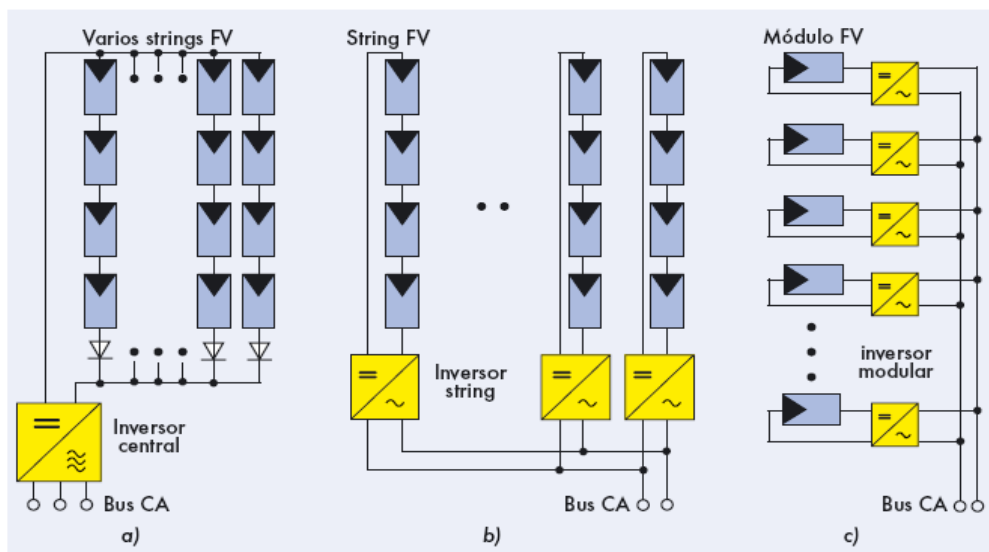


Рисунок 2.2.1.4 – Подключение инвертора в соответствии с его номинальной мощностью, а) Центральный инвертор, в) струнный инвертор, с) модульный инвертор

Преобразование напряжения осуществляется с помощью трехфазного трансформатора (см. рисунок 2.2.1.5) первичная обмотка трансформатора соединена в треугольник, а вторичная в звезду с изолированной нейтралью (технические характеристики представлены в таблице А.8, Приложение А).



Рисунок 2.2.1.5 – Трехфазный трансформатор

На рисунке 2.2.1.6 показана точка электрического соединения фотоэлектрической электростанции в провинции Сантьяго-де-Куба с централизованной сетью.

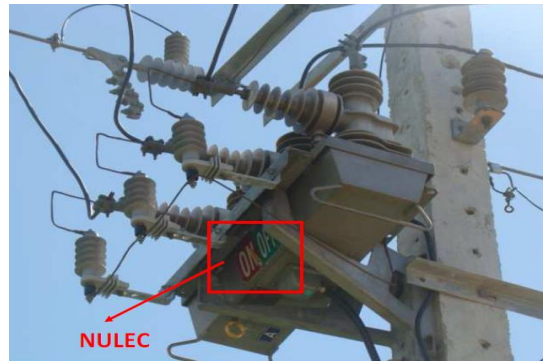


Рисунок 2.2.1.6 – Точка соединения между фотоэлектрической централью и национальной электрической сетью

Все указанные выше устройства должны быть смоделированы с целью дальнейшего решения поставленных в работе задач, чему будут посвящены следующие разделы.

### **2.2.1.1 Математическая модель фотогальванической ячейки**

В разделе 1.2.1 уже была описана структура СЭ, его параметры, характеристики, а также эквивалентная схема. СЭ является основным строительным блоком фотоэлектрической системы. Отдельная ячейка обычно довольно мала и вырабатывает мощность порядка 1 или 2 Вт. Для увеличения выходной мощности солнечных ячеек, их соединяют последовательно или параллельно, чтобы сформировать более крупные секции, называемые модулями. Модули, в свою очередь, могут быть соединены в более крупные единицы, называемые массивами, которые могут быть связаны между собой для увеличения

мощности. При последовательном соединении ячеек или модулей выходное напряжение может быть увеличено. С другой стороны, для достижения большего значения выходного тока, ячейки или модули необходимо подключить параллельно (см. рисунок 2.2.1.7) [91].

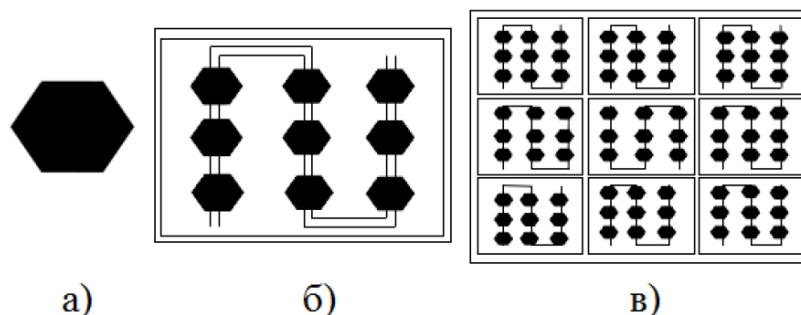


Рисунок 2.2.1.7 – а) Солнечная ячейка, б) Солнечный модуль, в) Солнечная батарея [91]

Математическая модель фотоэлектрического элемента представлена на рисунке 2.2.1.8.

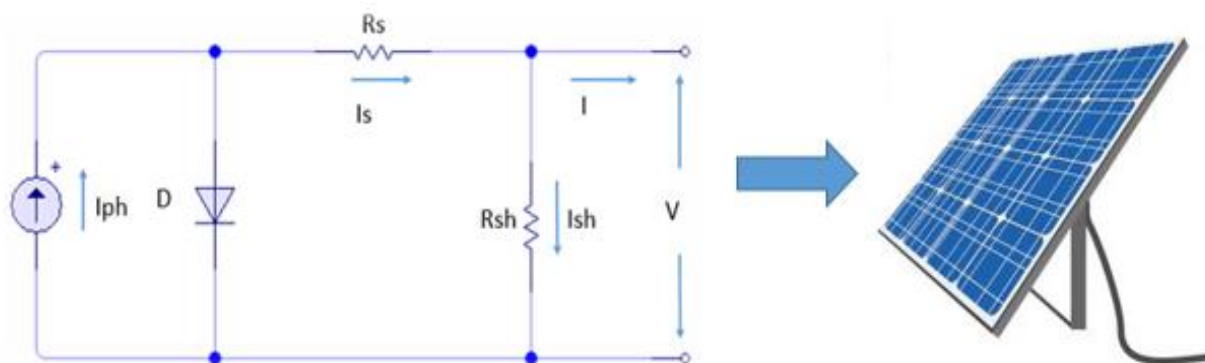


Рисунок 2.2.1.8 – Эквивалентная схема солнечной батареи:  $R_{sh}$  – шунтирующее сопротивление,  $R_s$  – последовательное сопротивление,  $D$  – диод.

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 следующим [87]:

$$I = \frac{I_{sc} \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) - V_{oc} \left(\frac{B}{A}\right)}{1 - \frac{B}{A}} * \frac{G}{G_{stc}} - \left( \frac{I_{sc} \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) - V_{oc} \left(\frac{B}{A}\right)}{A - B} - \frac{V_{oc}}{A * R_{sh}} \right) * \left( e^{\frac{V + I * R_s}{n * V_T}} - 1 \right) - \frac{V + I * R_s}{R_{sh}}; \quad (2.1)$$

$$A = e^{\frac{V_{oc}}{n * V_T}} - 1; \quad (2.2)$$

$$B = e^{\frac{I_{sc} * R_s}{n * V_T}} - 1; \quad (2.3)$$

$$I_{sc} = I_{scm} * N_{cp} + CTI * (T_c - T_{stc}); \quad (2.4)$$

$$V_{oc} = V_{ocm} - 0.0023 * (T_c - T_{stc}) * N_{cs}; \quad (2.5)$$

$$V_t = \frac{k * (t_c + 273)}{q} * N_{cs}, \quad (2.6)$$

где:  $R_s$  – последовательное сопротивление ( $\Omega$ );  $R_{sh}$  – параллельное сопротивление ( $\Omega$ );  $n$ – фактор идеальности;  $I_{sc}$  – ток короткого замыкания при нормальных условиях работы (СТУ) (А);  $V_T$  – напряжение тепловое диодное (mV);  $V$  – рабочее напряжение (V);  $I$  – рабочий ток (А);  $V_{oc}$  – напряжение разомкнутой цепи при стандартном тестовом условии (СТУ) (V);  $CTI$  – температурный коэффициент тока короткого замыкания;  $G_{stc}$  – солнечное излучение при нормальных условиях работы (СТУ) ( $Вт/м^2$ );  $G_{hi}$  – солнечное излучение ( $Вт/м^2$ );  $N_{cs}$  – количество солнечных элементов в серии в солнечном модуле ( $\Omega$ );  $N_{cp}$  – число солнечных элементов параллельно в солнечном модуле ( $\Omega$ );  $t_c$  – температура батареи ( $^{\circ}C$ );  $t_{stc}$  – температура батареи при стандартных тестовых условиях ( $25^{\circ}C$ );  $k$  – Постоянная Больцмана  $1.381 * 10^{-23}$  (Дж/К);  $q$  – заряд электрона  $1.6 * 10^{-19}$  (К);  $n$  – коэффициент идеальности диода (1~2).

Сопротивление, соответствующее эквивалентной схеме фотоэлектрической панели, рассчитывается, как показано в следующих уравнениях [87]:

$$R_s = \left(1 - \frac{ff}{ff_0}\right); \quad (2.7)$$

$$R_{sh} = \frac{ff_0 * \left(\frac{V_{oc}}{V_t} + 0.7\right)}{\left(1 - \frac{ff}{ff_0}\right)} * \frac{V_{oc}}{I_{sc}}; \quad (2.8)$$

$$ff_0 = \frac{\frac{V_{oc}}{V_t} - \ln\left(\frac{V_{oc}}{V_t} + 0.72\right)}{\frac{V_{oc}}{V_t} + 1}; \quad (2.9)$$

$$ff = \frac{V_{mpp} * I_{mpp}}{V_{oc} * I_{sc}}, \quad (2.10)$$

где:  $ff$  – фактор заполнения, предоставленный производителем,  $ff_0$  – Идеальный коэффициент заполнения устройства,  $V_{mpp}$  – напряжение в точке максимальной мощности вольт– амперной фотоэлектрической панели (V),  $I_{mpp}$  – ток в точке максимальной мощности вольт– ампера фотоэлектрической панели (A).

В эпиграфе показаны уравнения, которые описывают электрическое поведение солнечного модуля. Уравнения необходимы для получения зависимости влияния метеорологически переменных на характеристики солнечной панели (см. раздел 2.2.1).

### **2.2.1.2 Тепловая модель фотоэлектрической панели**

Далее представлены результаты математического моделирования. В следующем разделе будет изучена тепловая математическая модель солнечного модуля с точки зрения тепловых процессов, показана взаимосвязь, существующая между рабочей температурой солнечных модулей и климатическими факторами. В научной литературе предлагаются различные определения рабочей температуры солнечной панели.

В результате проведенного анализа для дальнейшего исследования в работе выбрана тепловая математическая модель для определения рабочей температуры солнечного модуля [58], в которой используются интерактивные методы. На рисунке 2.2.1.9 представлена упрощенная тепловая модель фотоэлектрического модуля.

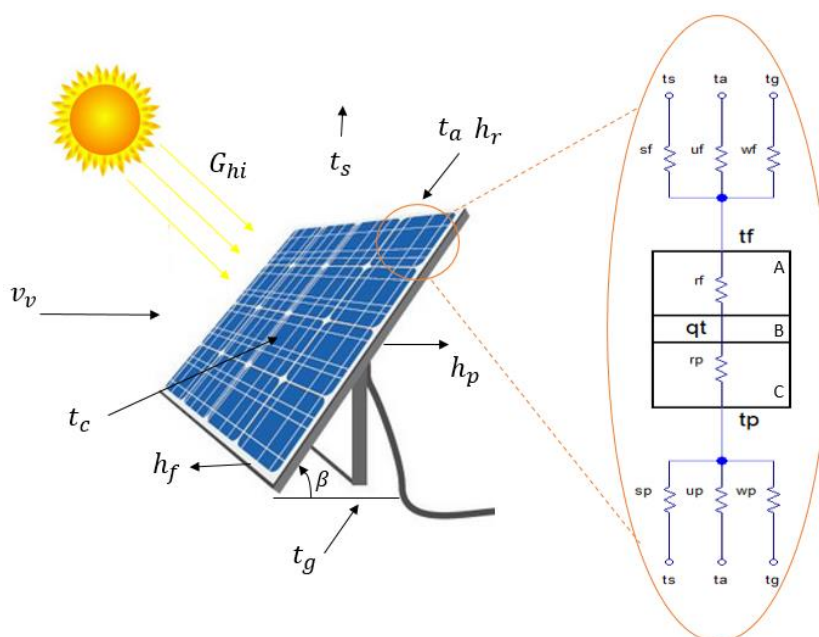


Рисунок 2.2.1.9 – Тепловая модель фотоэлектрического модуля [58]

Далее представлена ее математическая модель:

$$q_t = \alpha * (1 - r) * G_{hi} - \eta * G_{hi}, \quad (2.11)$$

где:  $q_t$  – тепловая генерация на единицу площади ( $W/m^2$ );  $r$  – доля мощности, отраженная в солнечном элементе ( $m^2 \text{ } ^\circ C/W$ );  $\alpha$  – доля мощности, потребляемой солнечным элементом;  $G_{hi}$  – прямое глобальное излучение ( $W/m^2$ );  $\eta$  – эффективность солнечной панели (%).

Коэффициент конвективной передачи передней части солнечной панели  $h_{cf}$ , ( $W/m \text{ } ^\circ C$ ):

$$h_{cf} = [(2.8 - 3 * v_v)^3 + 4.74 * (t_c - t_a)]^{1/3}. \quad (2.12)$$

Коэффициент передачи конвекции задней части солнечной панели  $h_{cp}$ , ( $W/m \text{ } ^\circ C$ ):

$$h_{cp} = [(2.1 - 2.3 * v_v)^3 + 3.80 * (t_c - t_a) * \sin(\beta)]^{1/3}. \quad (2.13)$$

Коэффициент пропускания излучения передней панели солнечной батареи  $h_{rf}$ , ( $W/m \text{ } ^\circ C$ ):

$$h_{rf} = \epsilon_f * \left[ 6.67 * 10^{-8} * t_a^3 * \left( 1 + (t_c/t_a) * (1 + (t_c/t_a))^2 \right) \right], \quad (2.14)$$

где:  $t_a$  – температура окружающей среды ( $^\circ C$ );  $t_c$  – температура фотоэлемента ( $^\circ C$ );

Коэффициент пропускания излучения задней части солнечной панели  $h_{rp}$ , (W/m°C):

$$h_{rp} = h_{rf} * (\epsilon_f / \epsilon_p); \quad (2.15)$$

$$r_f = \sum \left( \frac{x}{k} \right)_i \quad r_p = \sum \left( \frac{x}{k} \right)_i; \quad (2.16)$$

$$h_f = h_{cf} + h_{rf} \quad h_p = h_{cp} + h_{rp}, \quad (2.17)$$

где:  $k$  – проводимость каждого инкапсулирующего слоя (W/m°C);  $v_v$  – скорость ветра (m/s);  $\beta$  – угол наклона фотоэлектрического генератора (°C);  $\epsilon_f$  – коэффициент излучения поверхности лицевой панели;  $\epsilon_p$  – коэффициент излучения поверхности лицевой панели;  $x$  – толщина каждого слоя (m);

$$a_f = 1 + h_f * r_f \quad a_p = 1 + h_p * r_p, \quad (2.18)$$

где:  $h_f$  – общий коэффициент проводимости и фронтальное тепловое излучение (W/m°C);  $h_p$  – коэффициент глобальной проводимости и последующее тепловое излучение (W/m°C);  $r_f$  – сопротивления теплопроводности фронтальных изоляционных материалов ( $m^2$  °C/W);  $r_p$  – сопротивление теплопроводности последующих герметизирующих материалов ( $m^2$  °C/W).

Температура точки росы  $t_{pr}$ , (°C): Точка росы — это температура воздуха, при которой содержащийся в нём пар достигает состояния насыщения и начинает конденсироваться в росу.

$$t_{pr} = \frac{243.12 * \ln \left[ \left( \frac{e^{\left( \ln(611.2) + \frac{17.62 * t_a}{243.12 + t_a} \right) * 100}}{h_r} \right) - 1559.72 \right]}{24.035 - \ln \left( \frac{e^{\left( \ln(611.2) + \frac{17.62 * t_a}{243.12 + t_a} \right) * 100}}{h_r} \right)}, \quad (2.19)$$

где:  $h_r$  – относительная влажность (%);  $t_a$  – температура окружающей среды (°C).

Эквивалентная абсолютная температура неба, указанная для неба  $t_s$ , (°C):

$$t_s = t_a * \left[ 0.8 + \frac{t_{pr}}{250} \right]^{0.25}, \quad (2.20)$$

где:  $t_a$  – температура окружающей среды (°C).

Коэффициенты теплового излучения,  $[W/m^2 \text{ } ^\circ\text{C}]$ : Излучательная способность объекта (коэффициент теплового излучения) – отношение мощности излучения объекта при данной температуре к мощности излучения абсолютно черного тела (АЧТ). АЧТ определяется как поверхность, излучающая максимальное количество энергии при данной температуре. Излучательная способность АЧТ равна 1,00.

$$s_f = s_p = \left[ 0.711 + 0.56 * \frac{t_{pr}}{100} + 0.73 * \left( \frac{t_{pr}}{100} \right)^2 \right] + 0.013 * \cos \left( 2\pi * \frac{h}{24} \right) + 1.2 * 10^{-4} * (p_a - 1000), \quad (2.21)$$

где:  $s_f$  – коэффициенты теплового излучения в небо от передней части солнечного модуля ( $W/m^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ );  $s_p$  – коэффициенты теплового излучения в небо от задней части солнечного модуля ( $W/m^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ );  $p_a$  – атмосферное давление [Bar];  $h$ – часы дня [час];  $t_{pr}$  – Температура точки росы (°C).

Коэффициенты теплового излучения на землю, ( $W/m^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ):

$$w_f = \left( \frac{6.67 * 10^{-8} * \left( \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) * \epsilon_f}{\frac{1 - \cos(\beta)}{2} * (1 - \epsilon_f) + \epsilon_f} \right) * (t_f^4 - t_g^4) * (t_f - t_g); \quad (2.22)$$

$$w_p = \left( \frac{6.67 * 10^{-8} * \left( \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) * \epsilon_p}{\frac{1 - \cos(\beta)}{2} * (1 - \epsilon_p) + \epsilon_p} \right) * (t_p^4 - T_g^4) * (t_p - t_g), \quad (2.23)$$

где:  $w_f$  – коэффициенты теплового излучения на землю от передней части солнечного модуля ( $W/m^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ );  $w_p$  – коэффициенты теплового излучения на землю от задней части солнечного модуля ( $W/m^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ );  $h$ – часы дня (час);  $t_g$  – эквивалентные абсолютные температуры почвы (°C).

Следующие уравнения решаются интерактивными математическими методами:

$$t_c = \left[ \frac{q_t + \left( \frac{w_f}{a_f} + \frac{w_p}{a_p} \right) * (t_g - t_a) + \left( \frac{s_f}{a_f} + \frac{s_p}{a_p} \right) * (t_s - t_a)}{\left( \frac{h_f}{a_f} + \frac{h_p}{a_p} \right)} \right] - t_a ; \quad (2.24)$$

$$t_f = \left[ \frac{(t_c - t_a) + r_f * w_f * (t_g - t_a) + r_f * s_f * (t_s - t_a)}{a_f} \right] - t_a ; \quad (2.25)$$

$$t_p = \left[ \frac{(t_c - t_a) + r_p * w_p * (t_g - t_a) + r_p * s_p * (t_s - t_a)}{a_p} \right] - t_a, \quad (2.26)$$

где:  $t_f$  – абсолютные температуры лицевой поверхности панели (°C);  $t_a$  – температура окружающей среды (°C);  $t_c$  – температура фотоэлемента (°C);  $t_g$  – эквивалентные абсолютные температуры почвы (°C);  $t_p$  – абсолютные температуры тыльной поверхности панели (°C).

Этот метод – стандартный подход, также называемый номинальной рабочей температурой ячейки ( $T_{NOCT}$ ). Температура ячейки ( $T_c$ ) рассчитывается по следующей формуле:

$$T_c = T_a + \frac{G_i}{G_{NOCT}} * (T_{NOCT} - T_{a,NOCT}), \quad (2.27)$$

где:  $T_a$  – температура окружающей среды,  $G_i$  – падающее излучение в плоскости панели;  $T_{NOCT}$  измеряется при падающем излучении  $G_{NOCT} = 800 \text{ Вт / м}^2$ , температуре окружающей среды  $T_a$ , NOCT 20 ° C и скорость ветра 1 м / с.  $T_{NOCT}$  – это данные, предоставленные производителем фотоэлектрической панели, что зависит от технологии, по которой он был построен, но обычно около 45°C [32].

По модели Курца мы можем рассчитать температуру ячейки, используя уравнение:

$$T_c = T_a + I * e^{-3.473 - 0.0594 * V_p}. \quad (2.28)$$

В литературе существует 6 математических моделей для расчета рабочей температуры солнечной панели, 3 из них используются в данном исследовании.

### 2.2.1.3 Математическая модель трехфазного инвертора

Трехфазный инвертор представляет собой схему с тремя параллельными ветвями, в каждой ветви содержится по два транзистора (см. рисунок 2.2.10). Важным компонентом ФЭС является преобразователь, который имеет в своем составе повышающий преобразователь напряжения (DC/DC-преобразователь) от 200 до 700 В, трехфазный инвертор, выполненный на основе IGBT-модулей по трехфазной мостовой схеме, пропорционально– интегральные регуляторы тока и напряжения (ПИ). Время открытия и за-крытия IGBT-модулей составляет несколько миллисекунд, что позволяет эффективно использовать принцип широтно– импульсной модуляции для получения синусоидальных напряжений на выходе инвертора.

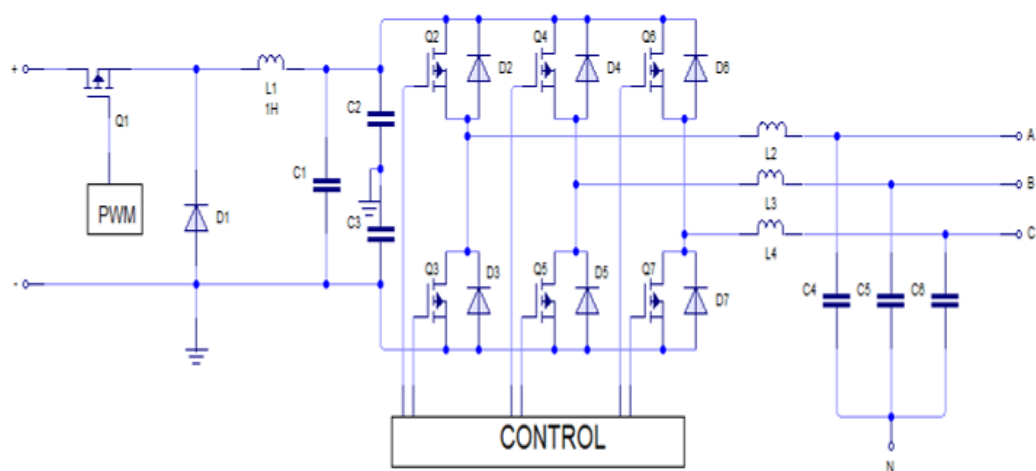


Рисунок 2.2.10 – Представление электрической схемы трехфазного инвертора

Генератор PWM отвечает за доставку сигнала переключения на полупроводниковые устройства питания. Для этой системы использовалась синусоидальная модуляция по ширине униполярного импульса. Основная частота модулированной волны должна иметь значение, равное значению желаемого выхода, в этом случае желаемая частота равна 60 Гц [33]. Ступень питания состоит из полупроводниковых переключающих устройств, в этом случае

смоделирована полная система мостового преобразования типа постоянного тока в переменный, как показано на рисунке 2.2.10.

Уравнения, описывающие математическое поведение преобразователя мощности BOOST, представлены ниже.

$$\frac{L di}{dt} = V_i - (1 - D) * V_c ; \quad (2.29)$$

$$\frac{C dv}{dt} = (1 - D) * I_L - \frac{V_c}{R} ; \quad (2.30)$$

$$V_o = \frac{V_i}{1-D} . \quad (2.31)$$

Как показано на рисунке 2.2.10, входной конденсатор работает как источник напряжения, а индуктивности – как источники тока. Эта схема решается путем применения законов Кирхгофа с учетом падения напряжения в каждом компоненте или тока, протекающего через него, из которого мы получаем следующие уравнения.

Для альтернативной части:

$$\begin{bmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{bmatrix} = L \frac{d}{dt} * \begin{bmatrix} I_a - I_b \\ I_b - I_c \\ I_c - I_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_a - V_b \\ V_b - V_c \\ V_c - V_a \end{bmatrix} = L \frac{d}{dt} * \begin{bmatrix} I_{ab} \\ I_{bc} \\ I_{ca} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} \quad \text{где:}$$

$$\frac{d}{dt} * \begin{bmatrix} I_{ab} \\ I_{bc} \\ I_{ca} \end{bmatrix} = \frac{1}{3L} * \begin{bmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{bmatrix} - \frac{1}{3L} * \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} . \quad (2.32)$$

Для части постоянного тока:

$$i_{dc} = C \frac{dv_{dc}}{dt} + \frac{v_{dc}}{R} ; \text{ то } \frac{dv_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} i_{dc} - \frac{v_{dc}}{RC} . \quad (2.33)$$

#### 2.2.1.4 Математическая модель трехфазного трансформатора

На рисунке 2.2.11 представлен трехфазный трансформатор с первичной обмоткой, вторичной обмотками.

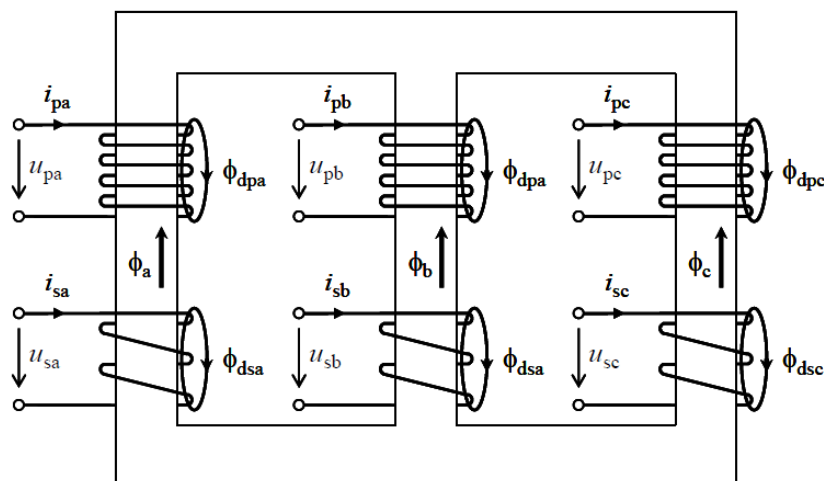


Рисунок 2.2.11 – Трехфазный трехстоечный трансформатор

Напряжения в первичной и вторичной обмотках трехфазного трансформатора:

$$u_{pk} = R_p * i_{pk} + L_{dp} * \frac{di_{pk}}{dt} + e_{pk}; \quad (2.34)$$

$$u_{sk} = R_s * i_{sk} + L_{ds} * \frac{di_{sk}}{dt} + e_{sk}, \quad (2.35)$$

где:  $u_{pk}$  – напряжение первичной обмотки,  $u_{sk}$  – напряжение вторичной обмотки,  $R_p$  – сопротивление первичной обмотки,  $R_s$  – сопротивление вторичной обмотки,  $i_{pk}$  – ток первичной обмотки,  $i_{sk}$  – ток вторичной обмотки,  $e_{pk}$  – индуцированное напряжение в первичной обмотке,  $e_{sk}$  – индуцированное напряжение во вторичной обмотке,  $L_{dp}$  – коэффициент первичной самоиндукции,  $L_{ds}$  – коэффициент вторичной самоиндукции.

### 2.2.1.5 Математическая модель профиля освещенности и продолжительности сияния в зависимости от месторасположения объекта

Солнечная радиация, приходящаяся на приемную ФЭМ, характеризуется профилем освещенности как функцией времени в течение светлого времени дня от восхода до захода Солнца, который в свою очередь зависит от угла между направлением на Солнце и плоскостью расположения ФЭМ (см. рисунок 2.2.12). Из этого следует, что необходимо рассчитать эту функцию для определения эффективного использования прямого преобразования солнечной энергии в заданном регионе [99].

Поэтому количество солнечной энергии, которое может преобразовать ФЭС, зависит от широты места, на котором она располагается, от угла ее наклона относительно направления на юг, от времени года и склонения Солнца [99].

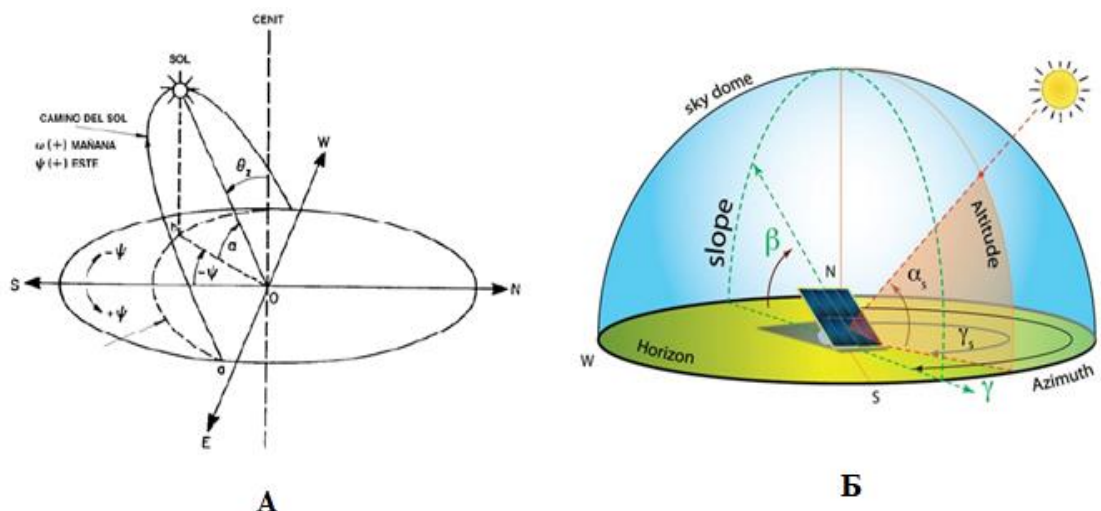


Рисунок 2.2.12 – Движение Солнца по поверхности земли [99]

Часовой угол Солнца рассчитывается по формуле [21]:

$$w = \left(\frac{\pi}{12}\right) * \left[ t_{utc} - 12 * \left(\frac{L_{loc} - L_{utc}}{15}\right) + \frac{E}{60} \right]; \quad (2.36)$$

$$t_{utc} = h - \left(\frac{L_{loc} - L_{utc}}{15}\right), \quad (2.37)$$

где:  $L_{loc}$  – Географическая долгота места ( $^{\circ}F$ );  $h$  – Время суток (час);  $w$  – Угол солнечного времени ( $^{\circ}F$ );  $t_{utc}$  – Стандартное время (час);  $L_{utc}$  – Длина опорного меридиана ( $^{\circ}F$ ).

Уравнение коррекции времени (Spencer 1971):

$$E = 229.18 * (7.5 * 10^{-6} + 1.868 * 10^{-3} * \cos(e) - 32.077 * 10^{-3} * \sin(e) - 11.4615 * 10^{-3} * \cos(2 * e) - 40.89 * 10^{-3} * \sin(2 * e)); \quad (2.38)$$

$$e = 2 * \pi * \left(\frac{n_d - 1}{365}\right). \quad (2.39)$$

Следующие два уравнения 2.40 и 2.41 представлены для расчета склонения Солнца:

$$\delta = 6.915 * 10^{-3} - 0.39912 * \cos(e) + 70.257 * 10^{-3} * \sin(e) - 6.758 * 10^{-3} * \cos(2 * e) + 0.907 * 10^{-3} * \sin(2 * e) - 2.692 * \cos(3 * e) + 1.48 * 10^{-3} * \sin(3 * e); \quad (2.40)$$

$$\theta_z = \cos^{-1}(\sin(\delta) * \sin(\varphi) + \cos(\delta) * \cos(\varphi) * \cos(w)); \quad (2.41)$$

$$\theta = \cos^{-1}(\beta) * \cos(\theta_z) + \sin(\beta) * \sin(\theta_z) * \cos(\gamma_s - \gamma); \quad (2.42)$$

$$\gamma_s = \operatorname{seg}(w) \left| \frac{\cos^{-1}(\theta_z) * \sin(\varphi) - \sin(\delta)}{\sin(\theta_z) * \cos(\varphi)} \right|; \quad (2.43)$$

$$\alpha = \sin^{-1}(\cos(\theta_z)), \quad (2.44)$$

где:  $\delta$  – Угол солнечного склонения (°F);  $\theta_z$  – Угол сенитал (°F);  $\varphi$  – Географическая широта места (°F);  $h$  – Время суток (час);  $\beta$  – Угол наклона солнечной панели относительно горизонтали (°F);  $\gamma_s$  – Солнечный азимут (°F);  $w$  – Угол солнечного времени (°F);  $\alpha$  – Солнечный угол высоты (°F);  $n_d$  – день года ( $1 \leq n_d \leq 365$ ).

$$r_b = \cos(\beta) + \sin(\beta) * \tan(\theta_z) * \cos(\gamma_s - \gamma). \quad (2.45)$$

Ниже приведены уравнения для расчета падающего горизонтального излучения на наклонной плоскости:

$$G_{oh} = \left[ 1.37 * \left( 1 + 0.033 * \frac{\cos(2 * \pi * n_d)}{365} \right) * \sin(\delta) * \sin(\varphi) + \cos(\delta) * \cos(\varphi) * \cos(w) \right] * 1000; \quad (2.46)$$

$$k_t = \frac{G_h}{G_{oh}}; \quad (2.47)$$

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

$$(k_t > 0.8) \rightarrow f = 0.165; \quad (k_t \leq 0.2) \rightarrow f = 1 - 0.09; \quad (2.48)$$

$$G_{dh} = (f * I_h); \quad (2.49)$$

$$G_{bh} = I_h - (f * I_h); \quad (2.50)$$

$$\tau_b = (1 - f) * k_t; \quad (2.51)$$

$$G_i = r_b * (I_{bh} + \tau_b * I_{dh}) + (1 - \tau_b) * G_{dh} * \left( \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) + \rho_g * G_h * \left( \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right), \quad (2.52)$$

где:  $G_h$  – горизонтальное солнечное излучение (Вт/м<sup>2</sup>);  $\rho$  – Коэффициент отражения почвы (см. таблицу А.9);  $G_{dh}$  – горизонтальное почасовое прямое

излучение ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ );  $G_{bh}$  – горизонтальное диффузное почасовое излучение ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ );  $k_t$  – почасовой индекс ясности;  $G_i$  – Горизонтальное излучение в наклонной плоскости.

### 2.2.2 Математические модели для определения факторов, влияющих на точность прогноза электроэнергии

Анализ главных компонент (РСА) является методом, который используют для описания набора данных в терминах новых некоррелированных переменных. Новых некоррелированных переменных называются компонентами. Компоненты описывают дисперсию и упорядочивают ее. Этот метод полезен для уменьшения размерности набора данных [52].

Технически, РСА осуществляет прогноз, на основании которого данные лучше всего представлены в терминах наименьших квадратов. Он преобразует набор возможных коррелированных переменных наблюдений в набор нелинейно коррелированных значений переменных, называемых основными компонентами.

С точки зрения применимости, метод основного компонента считается методом сокращения, то есть методом, который позволяет уменьшить размер числа исходных переменных, которые были учтаны при анализе [44].

*Существует два основных способа применения РАС :*

1. Метод на основе матрицы корреляции.
2. Метод на основе матрицы ковариации.

Для настоящего исследования был использован первый метод РСА:

В первую очередь в этом методе записывают корреляционную матрицу (2.53), где  $F_j$  – значение каждой из  $m$  случайных величин. Для каждого из  $n$  индивидов берутся значения всех переменных и записывают набор данных в матричной форме [44]:

$$(F_j^\beta)_{j=1, \dots, m}^{\beta=1, \dots, n} ; \quad (2.53)$$

$$M_j = \{F_j^\beta | \beta = 1, \dots, n\} \quad (2.54)$$

Из данных  $m \times n$ , соответствующих  $m$  случайным переменным, строится выборочная матрица корреляции, которая определяется следующим образом:

$$R = [r_{ij}] \in M_{m \times m}, \text{ где: } r_{ij} = \frac{\text{cov}(F_i, F_j)}{\sqrt{\text{var}(F_i) * \text{var}(F_j)}}. \quad (2.55)$$

Так как матрица корреляции симметрична, она диагонализируема и ее собственные значения  $\lambda_i$ , соответствуют числу  $m$  случайных величин:

$$\sum_{i=1}^m \lambda_i = m. \quad (2.56)$$

Из-за предыдущего свойства эти собственные значения называются весами каждого из  $m$  основных компонентов. Основные математически идентифицированные факторы представлены базой собственных векторов матрицы  $R$ . Таким образом, каждая из переменных может быть выражена как линейная комбинация собственных векторов или главных компонент.

### 2.2.3 Метод поверхности отклика

Понятие поверхности отклика включает зависимую переменную  $Y$ , называемую переменной отклика, и несколько независимых или регулируемых переменных. Если допускается, что все эти переменные измеримы, то поверхность отклика можно выразить согласно следующему выражению:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n). \quad (2.57)$$

Для получения уравнения поверхности отклика необходимо разработать несколько планов эксперимента. В каждом плане необходимо сделать аппроксимирование уравнения (2.57). Для осуществления метода необходимо использовать минимально возможное число экспериментов. В двумерной задаче простейшей поверхностью является плоскость, определяемая уравнением [80]:

$$Y = B_0 * X_0 + B_1 * X_1 + B_2 * X_2 + \varepsilon. \quad (2.58)$$

Если имеются основания считать, что поверхность не является плоской, то наиболее подходящей моделью может быть уравнение второй степени с двумя неизвестными:

$$Y = B_0 * X_0 + B_1 * X_1 + B_2 * X_2 + B_{11} * X_1^2 + B_{12} * X_1 * X_2 + B_{22} * X_2^2 + \varepsilon. \quad (2.59)$$

Для того, чтобы оценить параметры модели, необходимо применять соответствующий экспериментальный план для сбора необходимых данных.

На рисунке 2.2.3.1 используемых для расчета коэффициентов системы из 2 независимых переменных.

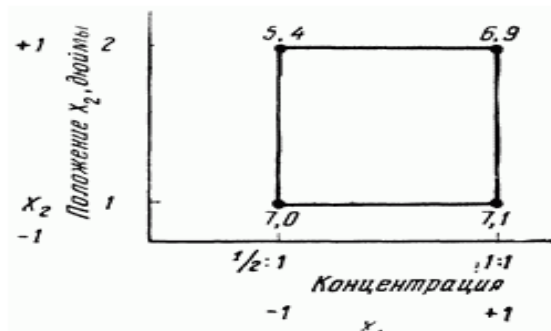


Рисунок 2.2.3.1 – Пример факторного эксперимента типа 2 X 2 на поверхности отклика [80]

Чтобы определить уравнение плоскости, наилучшим образом соответствующей этим четырем точкам, рассмотрим ошибку уравнения, определяющего значение  $Y$ .

Из уравнения 2.58 можно сказать, что:

$$\varepsilon = Y - B_0 * X_0 - B_1 * X_1 - B_2 * X_2. \quad (2.60)$$

Сумма квадратов для этой ошибки составляет:

$$\sum \varepsilon^2 = \sum (Y - B_0 * X_0 - B_1 * X_1 - B_2 * X_2)^2. \quad (2.61)$$

где: суммирование проводится по всем точкам, заданным в плане. Чтобы найти коэффициенты  $B$ , продифференцируем это уравнение по каждому параметру и приравняем все эти три уравнения нулю. Получим три нормальных уравнения наименьших квадратов, решив которые можно найти наилучшие оценки параметров  $B$ .

Дифференцируя это выражение, получаем:

$$\frac{\partial \sum \varepsilon^2}{\partial B_0} = -2 * \sum (Y - B_0 * X_0 - B_1 * X_1 - B_2 * X_2) * X_0 = 0; \quad (2.62)$$

$$\frac{\partial \sum \varepsilon^2}{\partial B_1} = -2 * \sum (Y - B_0 * X_0 - B_1 * X_1 - B_2 * X_2) * X_1 = 0; \quad (2.63)$$

$$\frac{\partial \sum \varepsilon^2}{\partial B_2} = -2 * \sum (Y - B_0 * X_0 - B_1 * X_1 - B_2 * X_2) * X_2 = 0. \quad (2.64)$$

Отсюда находим нормальные уравнения наименьших квадратов:

$$\sum X_0 Y = b_0 * \sum X_0^2 + b_1 * \sum X_0 X_1 + b_2 * \sum X_0 X_2 = 0; \quad (2.65)$$

$$\sum X_1 Y = b_0 * \sum X_0 X_1 + b_1 * \sum X_1^2 + b_2 * \sum X_1 X_2 = 0; \quad (2.66)$$

$$\sum X_2 Y = b_0 * \sum X_0 X_2 + b_2 * \sum X_1 X_2 + b_2 * \sum X_2^2 = 0. \quad (2.67)$$

При надлежащем выборе переменных эксперимента, эти уравнения можно значительно упростить и получить простое решение. Более сложные модели лучше всего решать методами матричной алгебры. Нормальные уравнения для наименьших квадратов имеют вид:

$$\sum X_0 Y = b_0 * n + b_1 * 0 + b_2 * 0; \quad (2.68)$$

$$\sum X_1 Y = b_0 * 0 + b_1 * \sum X_1^2 + b_2 * 0; \quad (2.69)$$

$$\sum X_2 Y = b_0 * 0 + b_1 * 0 + b_2 * \sum X_2^2. \quad (2.70)$$

Тогда коэффициенты уравнения получаются:

$$b_0 = \frac{\sum X_0 Y}{n}; \quad (2.71) \quad b_1 = \frac{\sum X_1 Y}{\sum X_1^2}; \quad (2.72) \quad b_2 = \frac{\sum X_2 Y}{\sum X_2^2}. \quad (2.73)$$

Если имеются три независимые или регулируемые переменные, то уравнение первой степени и в этом случае описывает плоскость или гиперплоскость:

$$Y = B_0 * X_0 + B_1 * X_1 + B_2 * X_2 + B_3 * X_3 + \varepsilon. \quad (2.74)$$

А уравнение второй степени имеет вид:

$$Y = B_0 * X_0 + B_1 * X_1 + B_2 * X_2 + B_3 * X_3 + B_{11} * X_1^2 + B_{22} * X_2^2 + B_{33} * X_3^2 + B_{12} * X_1 * X_2 + B_{13} * X_1 * X_3 + B_{23} * X_2 * X_3 + \varepsilon. \quad (2.75)$$

По мере усложнения поверхности должно оцениваться большее число коэффициентов, и число экспериментальных точек будет неизбежно возрастать [80].

### **2.3 Моделирование нагрузки электротехнического комплекса**

В качестве нагрузки в случае с подстанцией провинции Сантьяго-де-Куба приняты предприятия, относящиеся к административным, жилищным и хозяйственным объектам. Солнечная подстанция не обладает достаточной мощностью для обеспечения электропитания во всех режимах работы нагрузки. Отсюда прямая связь цели работы по увеличению генерации электроэнергии для обеспечения бесперебойной её подачи приёмникам.

### **2.4 Выводы по второй главе**

Исследования, представленные во второй главе, позволили сделать следующие выводы:

1. Проанализированы существующие подходы к формированию структуры электротехнического комплекса, содержащего солнечную электростанцию, что позволило выбрать два из них для дальнейшего исследования;
2. На основе анализа существующих математических моделей компонентов электротехнического комплекса, содержащего солнечную электростанцию, были выбраны наиболее корректные, позволяющие адекватно оценить функциональные и технические возможности этих компонентов.
3. Установлено, что повышение температуры солнечной батареи может привести не только к уменьшению генерируемой мощности, но и к невозможности функционирования солнечной электростанции как целостной системы. Это связано с тем, что при проектировании солнечной электростанции подбор оборудования часто осуществляется на основании только общих технических характеристик, указанных в технической документации, без учета температурных характеристик.
4. Проанализированы климатические условия, учет которых необходим при формировании электротехнического комплекса в условиях провинции

Сантьяго-де-Куба. К ним относятся: солнечное излучение ( $G_h$ ); температуру окружающей среды ( $T_a$ ); атмосферное давление ( $P_a$ ); относительную влажность ( $H_r$ ) и скорость ветра ( $V_v$ ).

### **ГЛАВА 3 АНАЛИЗ ГЕНЕРАЦИИ И ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭНЕРГИИ**

В настоящей главе будут проанализированы текущие условия эксплуатации, а также основные электрические переменные, представляющие интерес для солнечной электростанции Сантьяго-де-Куба, с учетом основных метеорологических переменных, которые влияют на производительность и, следовательно, на производство энергии.

#### **3.1 Моделирование изменения погодных условий, влияющих на выработку электроэнергии фотоэлектрическими модулями**

В рамках данного исследования была разработана модель в программном обеспечении Matlab электротехнического комплекса с фотоэлектрическими панелями мощностью 2.5 МВт (см. рисунок 3.1.1). Разработанная модель позволяет изучать основные электрические переменные, составляющие систему подключения к сети, с учетом конкретных погодных условий в регионе. Основной переменной, изучаемой с помощью модели Matlab / Simulink, является энергия, генерируемая фотоэлектрической системой без мониторинга и с системой слежения за Солнцем. Полученные в результате имитационного моделирования зависимости необходимы для оценки эффективности систем слежения за Солнцем в конкретных климатических условиях Республики Куба.

Для моделирования в реальных климатических условиях в программу вводятся данные, описывающие климатические характеристики региона. Эти климатические данные были получены с помощью метеорологической станции, установленной в нескольких метрах от солнечной электростанции мощностью 2,5 МВт в провинции Сантьяго-де-Куба.

В рамках данного диссертационного исследования, было проведено два типа моделирования, описывающие два случая. В первом случае учитывались только два климатических фактора-солнечная радиация и температура

окружающей среды. Во втором случае учитывались пять факторов-солнечное излучение, температура окружающей среды, относительная влажность, скорость ветра и атмосферное давление. Моделирование с различными переменными необходимо для того, чтобы выявить различия между результатами обеих симуляций и сделать окончательные выводы.

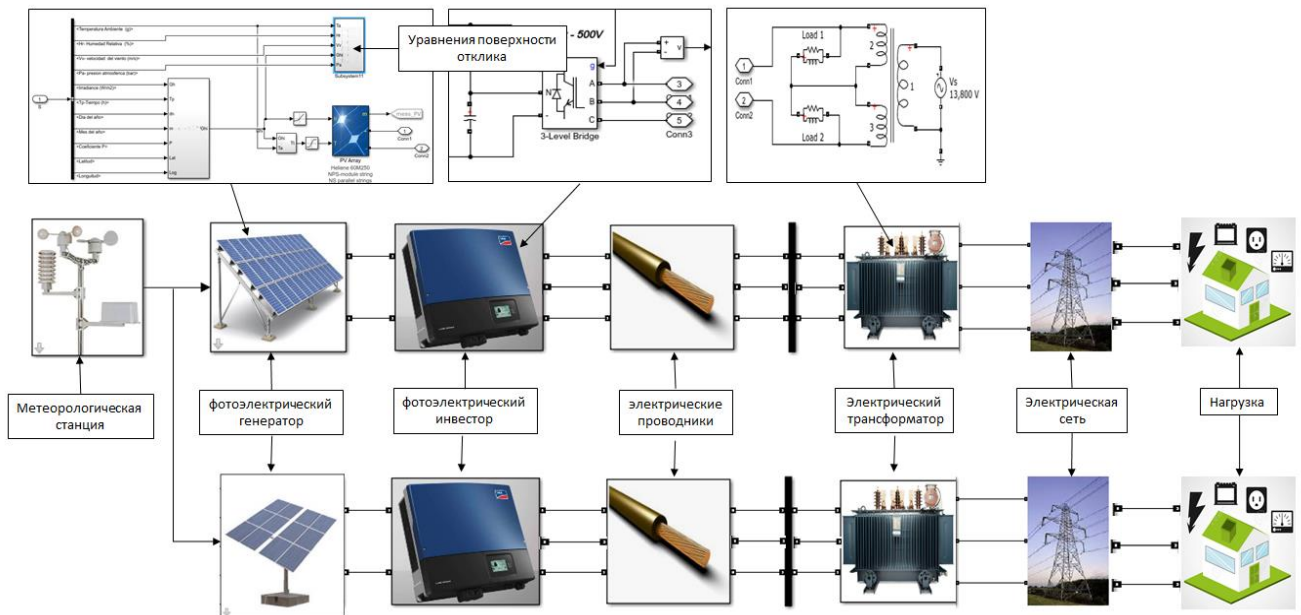


Рисунок 3.1.1 – Модель Matlab / Simulink электротехнического комплекса с фотоэлектрическими панелями мощностью 2.5 МВт

Модель состоит из четырех основных блоков:

1. Первый блок модели, называемый метеорологической станцией, отвечает за загрузку климатических данных, измеренных реальной метеорологической станцией. В программу вводятся следующие параметры: падающее глобальное излучение, температура окружающей среды, относительная влажность, атмосферное давление и скорость ветра, вводятся в программу, разработанную в Matlab / Simulink (см. таблицы А.1, А.2, А.3, А.4 и А.5, Приложение А).
2. Второй блок программы, разработанной в Matlab / Simulink, соответствует математическим моделям солнечного модуля и, следовательно, солнечного генератора. В блоке реализованы математическая модель для стационарной системы (см. раздел 2.2.1,

уравнения 2.1), и системы слежения за солнцем (см. раздел 1.2.3, уравнения 1.2 и 1.3).

3. Третий блок содержит математическую модель трехфазного инвертора системы (см. раздел 2.2.1, уравнения 2.32 и 2.33);
4. Четвертый блок содержит математическую модель трехфазного трансформатора (см. раздел 2.2.1, уравнения 2.34 и 2.35).

На рисунке 3.1.2 показаны блоки, составляющие статическую систему, реализованную в программе Matlab/Simulink:

1. Первый блок содержит уравнения, описывающие математическую модель солнечного модуля (см. раздел 2.2.1, уравнение 2.1);
2. Второй блок содержит уравнения поверхности отклика, полученные в результате исследования (см. раздел 3.4 и уравнение 3.4.1);
3. Третий блок содержит уравнения, которые описывают траекторию солнечного пути в небе в часовом диапазоне с 6:00 до 18:00 в обычный день (см. раздел 2.2.1, уравнение 2.52).
4. Четвертый блок содержит уравнения тепловой модели фотоэлектрического элемента для определения рабочей температуры фотоэлектрического модуля с учетом климатических параметров региона (см. раздел 2.2.1, уравнения 2.24, 2.27 и 2.28).

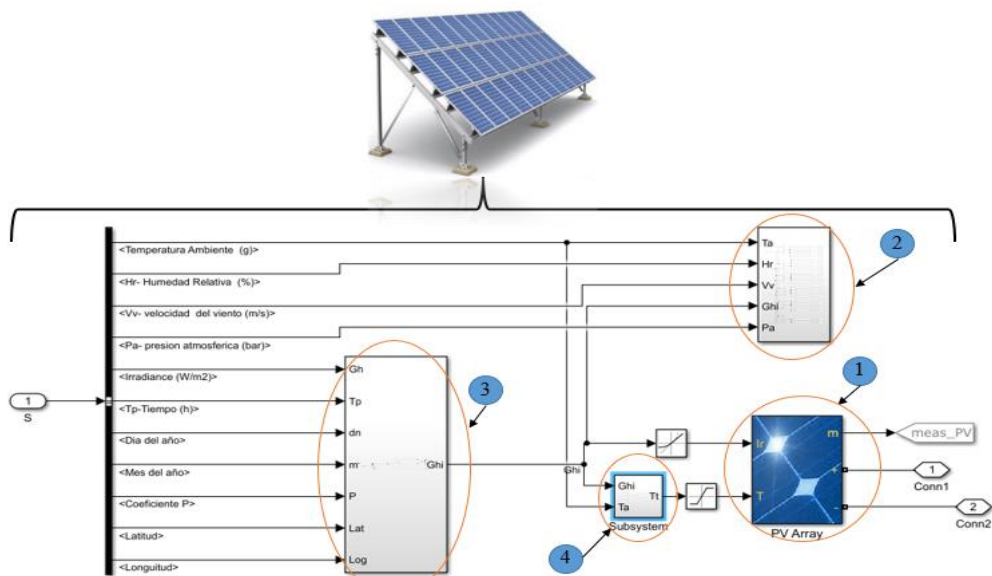


Рисунок 3.1.2 – Схема солнечного модуля (ДСМ -240-С) в Matlab / Simulink

Разработанная модель дает возможность фиксировать основные параметры солнечного модуля. На рисунках 3.1.3 и 3.1.4 представлены результаты моделирования.

На рисунке 3.1.3 представлено семейство вольт– амперных характеристик при постоянной температуре  $25^{\circ}\text{C}$  и изменяемом солнечном излучении от 100 до  $1100 \text{ Вт/м}^2$  с шагом  $100 \text{ Вт/м}^2$ .

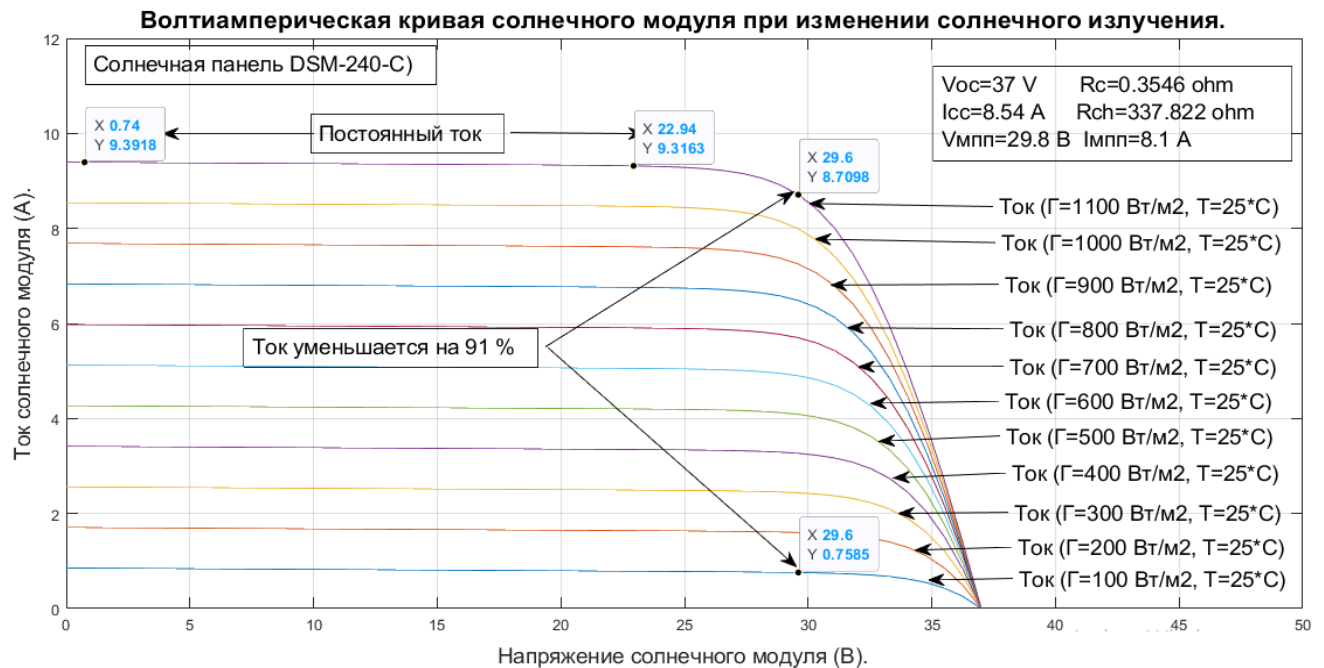


Рисунок 3.1.3 – Вольт-амперная характеристика фотоэлемента, работающего с различным солнечным излучением

На рисунке 3.1.3 представлены зависимости тока короткого замыкания, напряжения холостого хода и максимальной мощности фотоэлемента от солнечного излучения. Ток короткого замыкания и максимальная мощность имеют линейные зависимости от величины солнечного излучения. Максимальные значения мощности, напряжения и тока достигаются при значении солнечного потока  $1100 \text{ Вт/м}^2$ . При падении инсоляции на  $100 \text{ Вт/м}^2$  значения тока короткого замыкания и мощности падают в среднем на 94 %. В то время как напряжение холостого хода зависит от освещенности в меньшей степени и практически не изменяется.

На рисунке 3.1.4 показаны рабочие температуры солнечного модуля при  $50^{\circ}\text{C}$  (превышение стандартной рабочей на  $25^{\circ}\text{C}$ ), максимальная мощность панели

уменьшится примерно на 18% и следовательно, генерируемая энергия также уменьшится в такой же пропорции. Это зависимость объясняется тем, что при увеличении температуры эффективность солнечных батарей снижается.

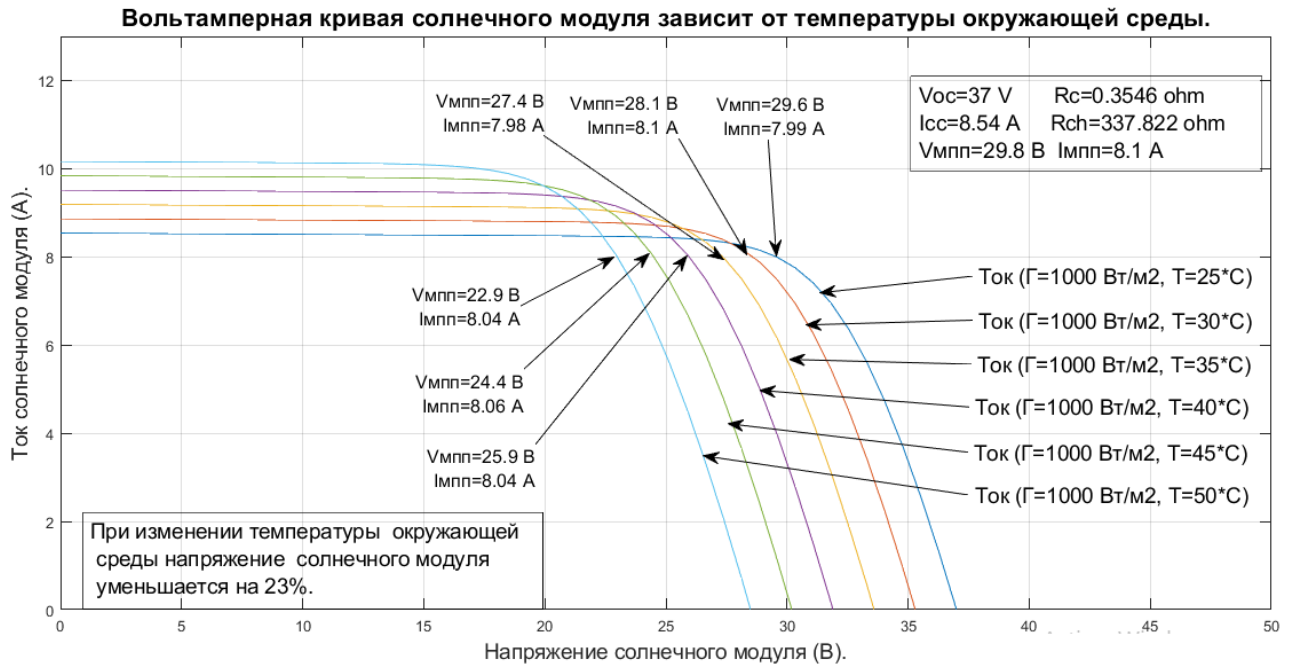


Рисунок 3.1.4 – Вольт– амперная характеристика фотоэлемента (ДСМ-240-С), работающего при разных рабочих температурах

Для рабочих температур выше 60 градусов можно констатировать, что мощность солнечного модуля, согласно математическому моделированию в программе Matlab (см. рисунок 3.3.1), уменьшается на 23%. Это что указывает на то, что энергия, генерируемая каждой из солнечных панелей солнечной электростанции в Сантьяго-де-Куба, также снизится на 23%. Это является недопустимым, так как подобное снижение производительности панели, может привести к резкому перепаду напряжения у потребителей. Поэтому необходим поиск технических средств и решений для минимизации вероятности нагрева панели до таких температур.

При этом обратная ситуация встречается весной, когда температура ниже 25°C выработка энергии тогда может быть больше, чем номинальная максимальная мощность  $P_m$ . То есть в данном случае охлаждения солнечных модулей положительно влияет на их производительность.

На рисунке 3.5.1 показаны результаты моделирования в MATLAB рабочей температуры солнечного генератора на электростанции мощностью 2,5 МВт (см. рисунок 3.3.1 и раздел 3.1). Результаты рабочей температуры солнечного генератора соответствуют августу 2018 года.

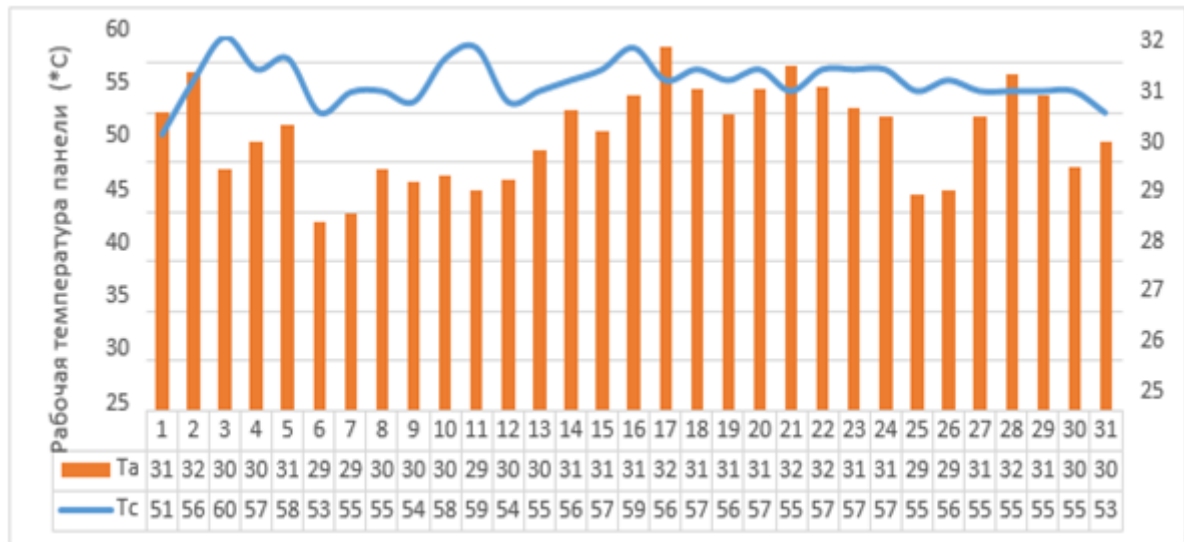


Рисунок 3.1.5 – Максимальная температура окружающей среды и максимальная рабочая температура солнечного генератора, солнечной электростанции мощностью 2,5 МВт в день в Сантьяго-де-Куба

Результаты рабочей температуры солнечного генератора соответствуют августу 2018 года, когда были измерены климатологические переменные (солнечная радиация, температура окружающей среды, атмосферное давление, скорость ветра и относительная влажность). В частности, было решено смоделировать этот месяц, поскольку для региона Сантьяго-де-Куба месяц с наивысшей солнечной радиацией и температурой окружающей среды соответствует августу (см. рисунок 2.1.2.1 и 2.1.3.1, раздел 2.1.2 и 2.1.3).

На рисунке 3.1.6 показано поведение рабочей температуры солнечной панели (модель ДСМ-240-С) в реальных климатических условиях.

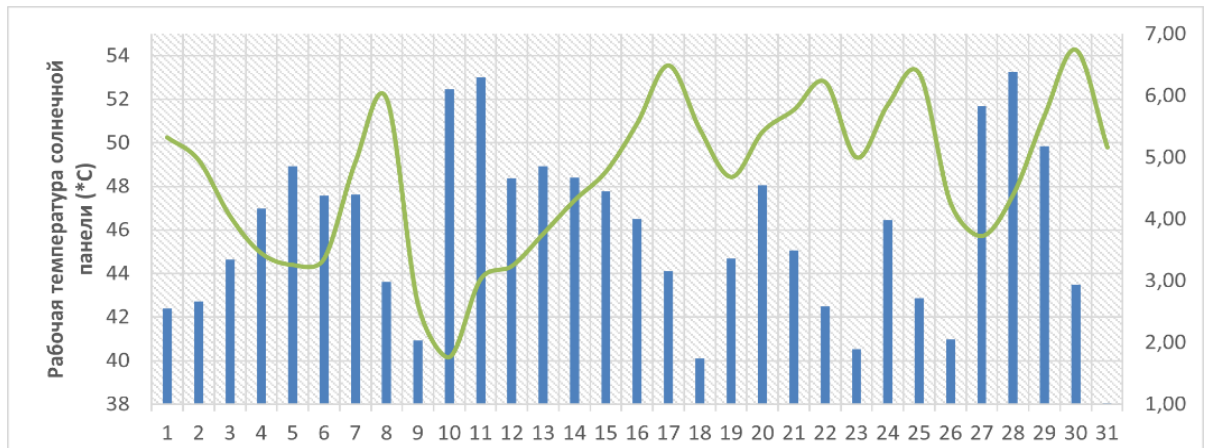


Рисунок 3.1.6 – Зависимость рабочей температуры солнечной панели от скорости ветра

На рисунке 3.1.6 показана зависимость рабочей температуры модуля и скорости ветра в регионе. Была выявлена следующая закономерность - если скорость ветра превышает 3 м/с, рабочая температура модуля (модель ДСМ-240-С) значительно снижается (когда скорость ветра 3 - 7 м/с, температура снижается на 3 - 5°C). Это является положительным моментом, поскольку, чем панель работает при стандартной рабочей температуре (25°C), тем выше ее производительность.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что для высоких скоростей ветра в регионе солнечный модуль будет иметь более эффективные электрические характеристики, так как его охлаждение будет выше, что вызывает снижение рабочей температуры солнечной панели.

В третьем блоке математической модели (см. рисунок 3.1.6) трехфазный инверторный блок комплекса (см. рисунок 3.1.7).

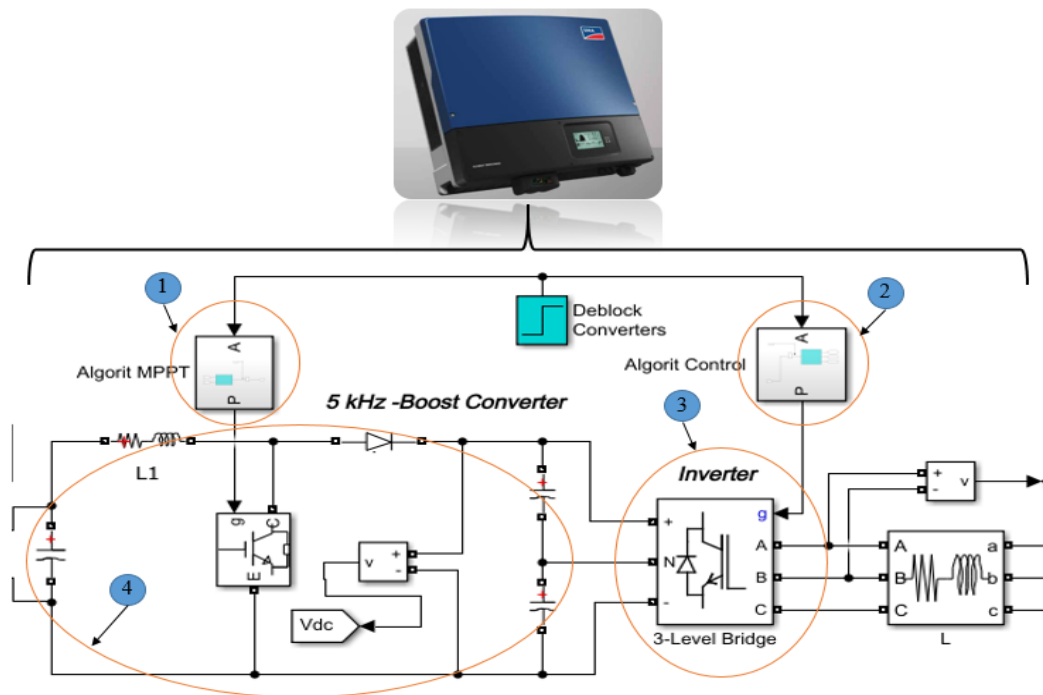


Рисунок 3.1.7– Представление математической модели трехфазного инвертора в Matlab/Simulink

1. В блоке 1 были реализованы все уравнения, относящиеся к алгоритму управления МППТ для преобразователя мощности Boost;
2. В блоке 2 реализованы уравнения и алгоритм;

В блоке 3 описан силовой каскад трехфазного инвертора (см. раздел 2.2.1.3);

В блоке 4 представлена электрическая схема, составляющая преобразователь мощности Boost (см. раздел 2.2.1.3).

На рисунке 3.1.8 показана модель трехфазного трансформатора в соответствии с реальными характеристиками трансформатора, используемого на солнечной электростанции мощностью 2,5 МВт в провинции Сантьяго - де - Куба в Республике Куба.

1. Блок 1 представляет нагрузки, соединенные фазами в трансформаторе.
2. Блок 2 представляет собой узел подключения, на котором проводятся все необходимые электрические измерения.

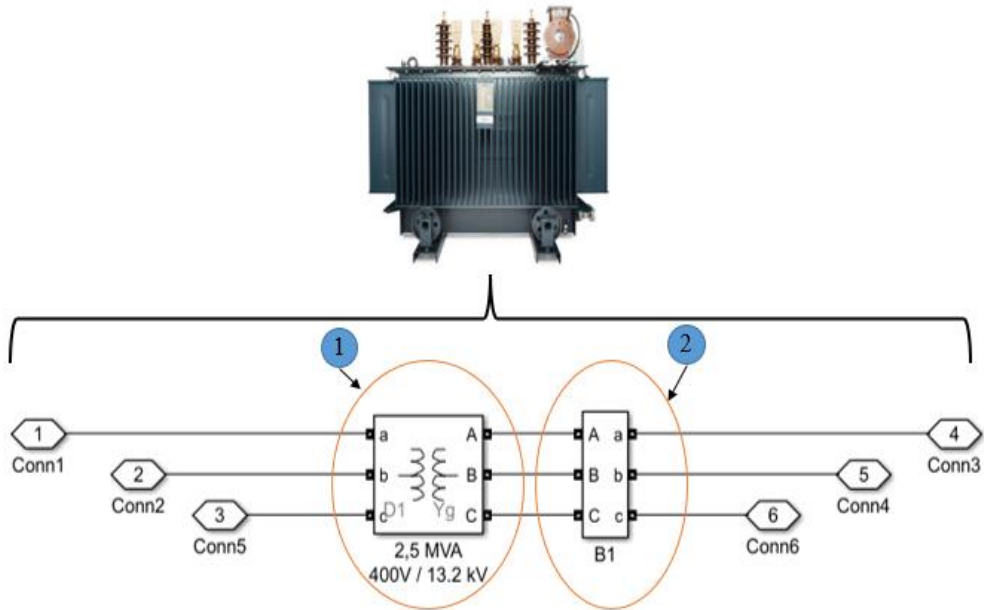


Рисунок 3.1.8 – Представление трехфазного трансформатора в программе Matlab / Simulink

Моделирование, выполненное в рамках данного исследования, позволит определить поведение фотоэлектрического модуля при изменении его рабочей температуры. Данные зависимости необходимы для повышения эффективности электротехнического комплекса в целом. Однако известно, что на рабочую температуру влияет не только температуры окружающего пространства, но и такие параметры как влажность, скорость ветра, давление и др. величины, то необходимо определить зависимости производимой солнечным модулем энергии и данных климатических переменных.

### 3.2 Результаты моделирования

По результатам моделирования в Matlab / Simulink было определено, что для конкретных климатических условий региона Сантьяго-де-Куба в самый жаркий месяц (максимальная температура окружающей среды  $32^{\circ}\text{C}$ ), разница в выработке электроэнергии солнечной электростанцией мощностью 2,5 МВт, в среднем составляют примерно 6% (солнечные панели солнечного генератора работают при температуре выше  $25^{\circ}\text{C}$ ). На рисунке 3.2.1 показаны результаты для августа 2018 года.

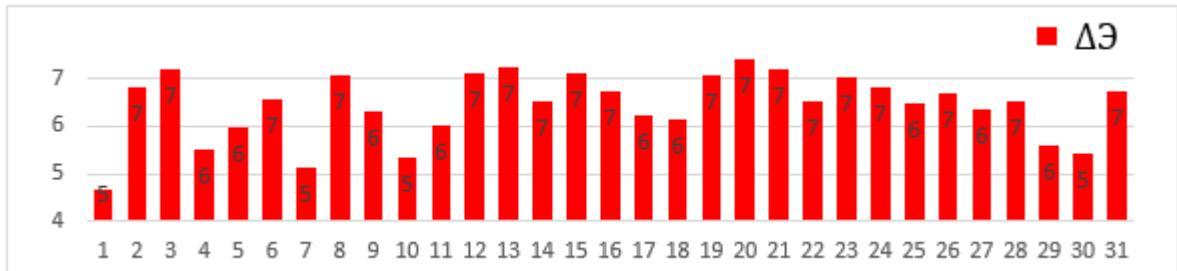


Рисунок 3.2.1 – Разница в энергии в системе в день в результате повышения рабочей температуры солнечной панели выше номинальных 25 °С (рассчитано в августе 2018 г)

На рисунке 3.2.1 было показано, что температура окружающей среды в регионе влияет на рабочую температуру солнечной панели – солнечная панель работает выше номинальных 25°C. На основании результатов, можно утверждать, что максимальные потери из-за температуры составляют 7% в течение всего года. Так как они были определены для самого жаркого месяца для региона Сантьяго-де -Куба.

Предыдущий вывод также проиллюстрирован на рисунке 3.2.2, на котором показано поведение энергии, произведенной 23 августа 2018 г. комплексом мощностью 2,5 МВт, когда солнечные панели солнечного генератора работают при рабочей температуре 57°C и температуре окружающей среды 31°C .

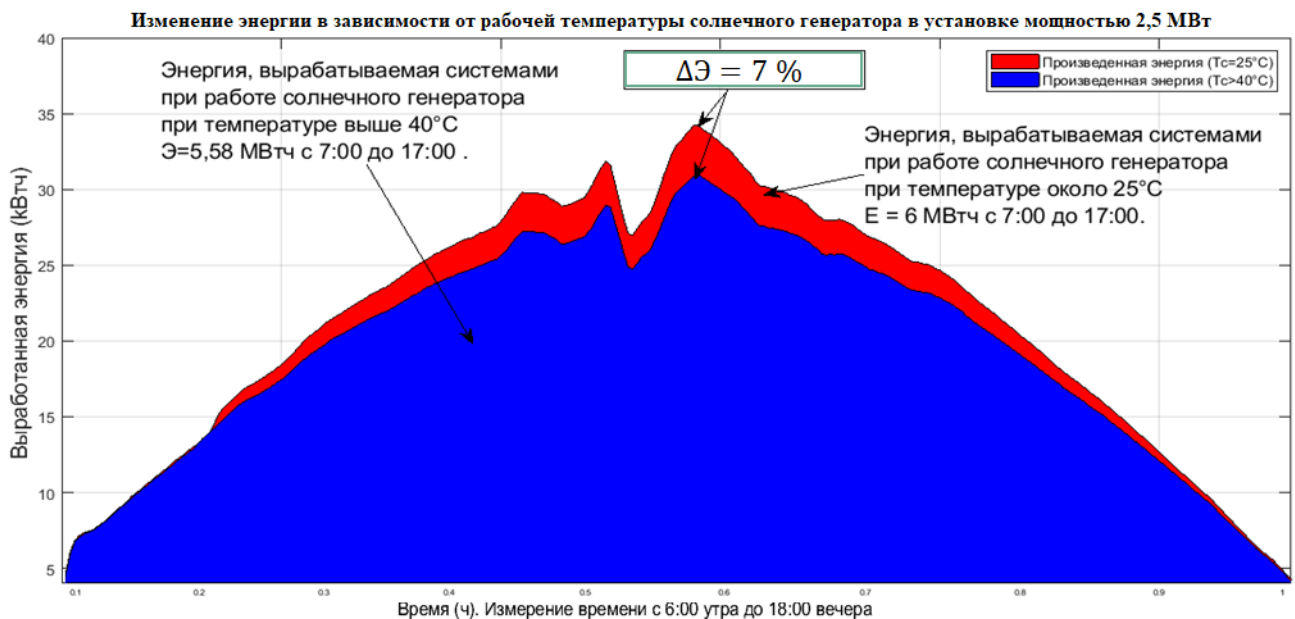


Рисунок 3.2.2 – Электроэнергия, поставляемая солнечной системой мощностью 2,5 МВт (23 августа 2018 г)

### 3.3 Математическое моделирование двухосной системы слежения за Солнцем

Эффективность систем солнечного мониторинга для конкретных климатических условий в районе Сантьяго-де-Куба в Республике Куба является удовлетворительной, уже в значениях, показанных на таблице 3.1, представляет процент прироста энергии, поставляемой в национальную электрическую сеть, обеспечиваемую системами слежения за солнцем, и по сравнению со стационарными системами.

Таблица 3.1 – Процент увеличения энергии, поставляемой с помощью систем слежения за солнцем, по сравнению со стационарными системами в конкретных климатических условиях Республики Куба

| Месяцы | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | Общая средняя |
|--------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---------------|
| Э (%)  | 26 | 21 | 28 | 35 | 32 | 40 | 40 | 43 | 31 | 30 | 24 | 22 | 31            |

Результаты, представленные на рисунке 3.3.1, были получены на основе климатических данных региона за август 2018 года. На рисунке показан процент прироста энергии за день, который достигается с помощью систем слежения за солнцем по сравнению с системами солнечной энергии.

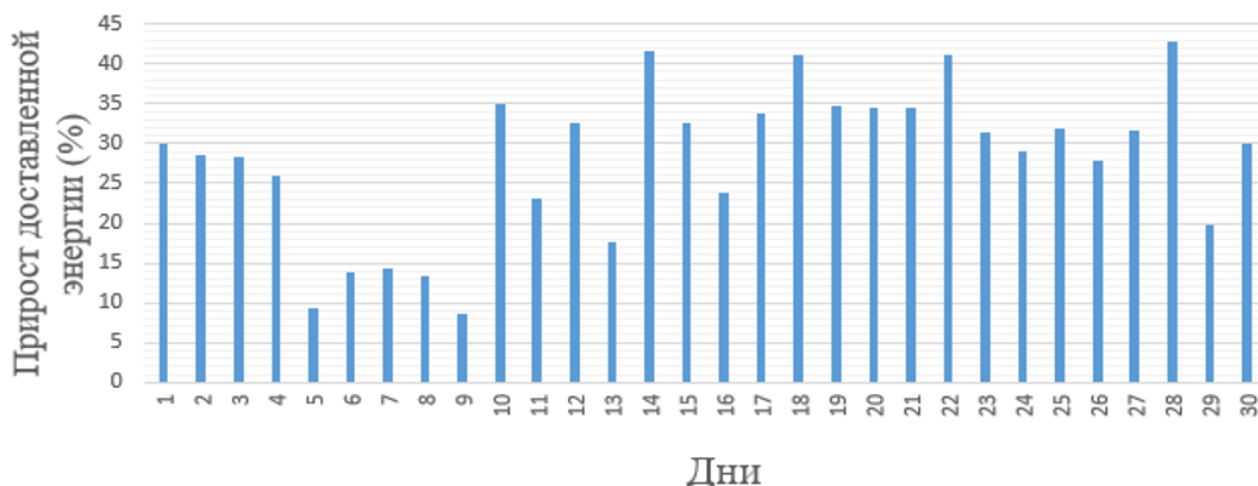


Рисунок 3.3.1 – Сравнение энергий, полученных в октябре 2018 года между системой слежения за Солнцем и стационарной солнечной системой

На рисунке 3.3.2 показаны результаты моделирования, выполненного в Matlab (см. рисунок 3.1.1). Энергия, производимая электростанцией мощностью 2,5 МВт

в течение обычного дня (23 Октябрь 2018 г.), с системой слежения за Солнцем и стационарным солнечным генератором.

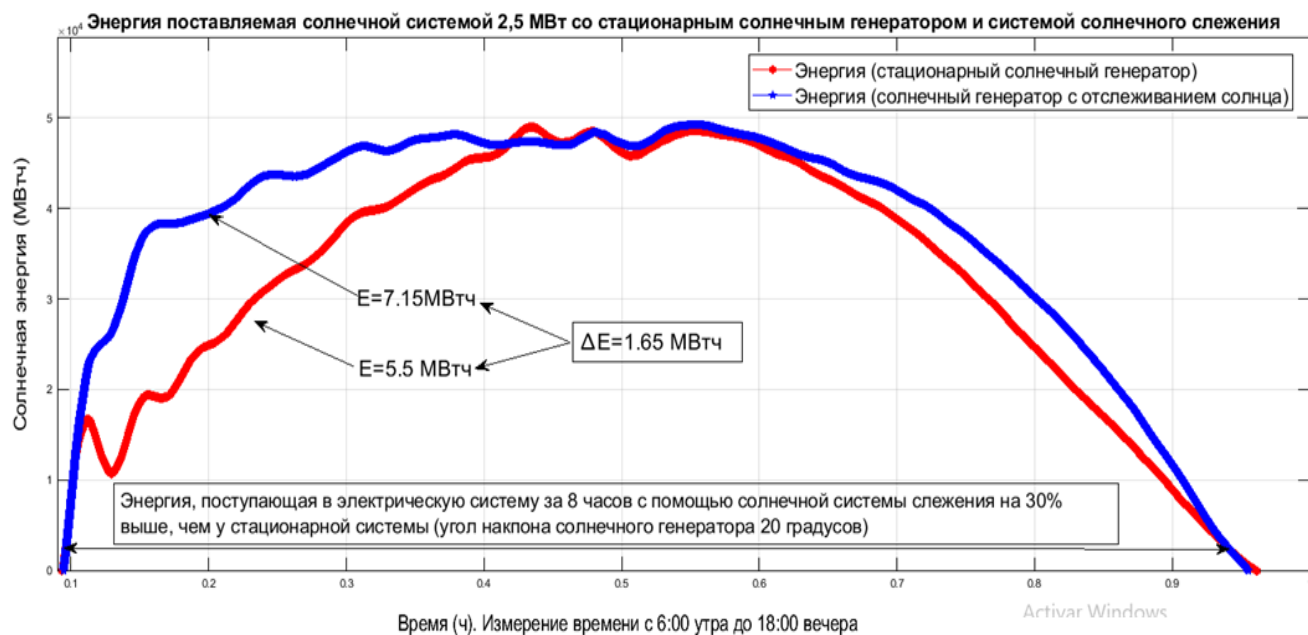


Рисунок 3.3.2 – Сравнение энергии, вырабатываемой солнечной системой мощностью 2.5 МВт с системой слежения за Солнцем и стационарным солнечным генератором с наклоном 20 градусов

Как видно на рисунке 3.3.2, для тех же смоделированных климатических условий в регионе Сантьяго-де-Куба, энергия, получаемая с помощью солнечной системы слежения, на 30 % выше по сравнению со стационарной системой. Это подтверждает тот факт, что солнечные системы слежения являются эффективной альтернативой улучшения параметров эффективности этих систем, а также для увеличения производства энергии.

### 3.3.1 Экспериментальные исследования систем слежения за Солнцем

Система слежения за Солнцем (солнечный трекер) - это комплекс устройств и механизмов, обеспечивающий оптимальное положение приемных поверхностей фотоэлектрических панелей относительно Солнца за счет следования за ходом Солнца по небосводу. Такая система дает возможность увеличивать количество солнечного излучения, поступающего на приемные поверхности.

Экспериментальная модель, разработанная на платформе Arduino, будет представлена ниже:

ARDUINO - это аппаратная и программная платформа с открытым исходным кодом, основанная на плате с аналоговыми и цифровыми входами и выходами, в среде разработки, основанной на языке программирования Processing. Иначе говоря, платформа с открытым исходным кодом для электронных прототипов. Будучи платформой с открытым исходным кодом, она пригодна для разработки любого типа проектов и не требует лицензирования. Первая коммерческая плата Arduino на базе 8 - разрядных процессоров Atmel AVR вышла на рынок в 2005 году, обладая низкой стоимостью, достаточным функционалом и низким порогом вхождения. В настоящее время доступны модели плат, с 32-разрядными микроконтроллерами ARM Cortex M3.

В настоящее время существуют другие платформы аналогичные Arduino, такие как Raspberry Pi, DSP и FPGA, которые обеспечивают преимущества программного и аппаратного обеспечения, надежны для проведения научных исследований с высокой точностью и качеством. Но так как Arduino является бесплатной платформой, то для данного исследования была выбрана она.

В этом разделе будут представлены части, составляющие систему солнечного мониторинга типа Azimut– Altitud (см. раздел 1.2.3). Это позволит изучить эффективность этих систем в конкретных условиях провинции Сантьяго–де–Куба. В республике Куба нет систем слежения за солнечными лучами, и их приобретение по–прежнему является дорогостоящим вариантом для экономических условий страны. Данный социально–экономический факт спровоцировал необходимость создания прототипа, который позволил бы изучить эффективность этих систем в Республике Куба.

Эта система управления трекером (см. рисунок 3.3.3) предназначена для того, чтобы улавливать солнечное излучение в направлении с востока и запада (слева и справа). Механическая система определяет, каким способом переместить панель, чтобы она была направлена непосредственно на источник света. Для

приведения в движение панели используется сервопривод, так как данный вид привода доступен в широком диапазоне размеров и их можно масштабировать в соответствии с размерами панели.

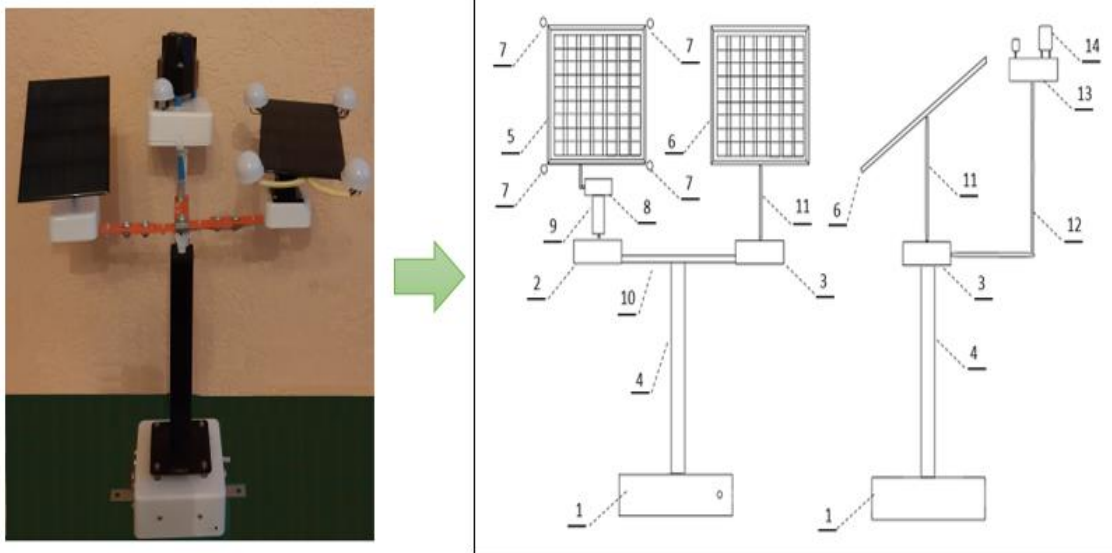


Рисунок 3.3.3 – Экспериментальный стенд

В работе предлагается система, которая содержит алгоритмы, объединяющие два традиционных метода слежения за Солнцем, применимые к 2-осевым вращающимся солнечным панелям (Астрономическое слежение и оптическое слежение), которые вычисляют оптимальную ориентацию панели (в пределах ее диапазона движения).

Астрономическое слежение считается более эффективным, чем оптическое слежение, так является более надежным: оно не подвержено влиянию загрязненности и всегда располагает в пространстве фотоэлектрическую панель в точке с максимальным солнечным излучением, независимо от погодных условий (пасмурные дни и т.д.). Поэтому в данном способе предлагается сочетание обоих методов мониторинга.

Представленный алгоритм обрабатывает данные о географическом положении, включая широту и долготу область применения системы, ориентацию оси вращения к вертикали, наклон оси вращения к горизонтали или азимут, времени суток и дате (см. раздел 2.2.1.5).

Метод позволяет рассчитать углы положения Солнца, как по горизонтальной, так и по вертикальной оси (например, вращая солнечную панель вокруг своей оси вращения каждые 0,5 градуса с заданным временем движения) в пределах рабочего диапазона. Отслеживание солнечной панели совершается в диапазоне горизонтального углового перемещения 0 - 180 градусов и в диапазоне вертикального углового движения 0 - 90 градусов.

Как горизонтальное, так и вертикальное движение выполняются путем математического расчета положения солнца как функции времени, этот угол является азимутом (уравнение 1.3), который описывает горизонтальное движение положения солнца на его траектории запад - восток и солнечная высота (уравнение 1.2), которая описывает вертикальное движение, размещая солнечный модуль перпендикулярно солнечным лучам.

Вся эта информация, собранная экспериментальной моделью, может быть загружена через файл формата txt для последующей обработки этой информации с помощью программного обеспечения, разработанного в Guide / Matlab (см. раздел 3.3.2).

В качестве платформы программирования использовалась среда IDE версии 1.8.5 Arduino, в которой можно запрограммировать все инструкции и коды, которые впоследствии будут загружены в микропроцессор.

Как показано на рисунке 3.3.3, программирование экспериментальной модели для солнечного слежения состоит из двух основных этапов: первый этап отвечает за измерения и сбор данных, предоставляемых различными датчиками, а второй этап отвечает за алгоритм мониторинга солнца.

Первыми функциями, которые выполняет микропроцессор, является выполнение кодов инициации. Затем он выполняет считывание и получает значения всех датчиков системы. Как только подтверждается, что нет ошибок измерения или неисправностей датчика, эта информация сохраняется в памяти microSD и отображается Display. После считывания данных с датчиков, микропроцессор выполняет коды для отслеживания положения Солнца. После вычисления горизонтальных и вертикальных углов солнечного пути, эти угловые

значения корректируются с помощью датчиков света, которые ищут среднее значение максимальной интенсивности света, расположенной в этой точке, значения горизонтального и вертикального углов регулируются в соответствии с допуском.

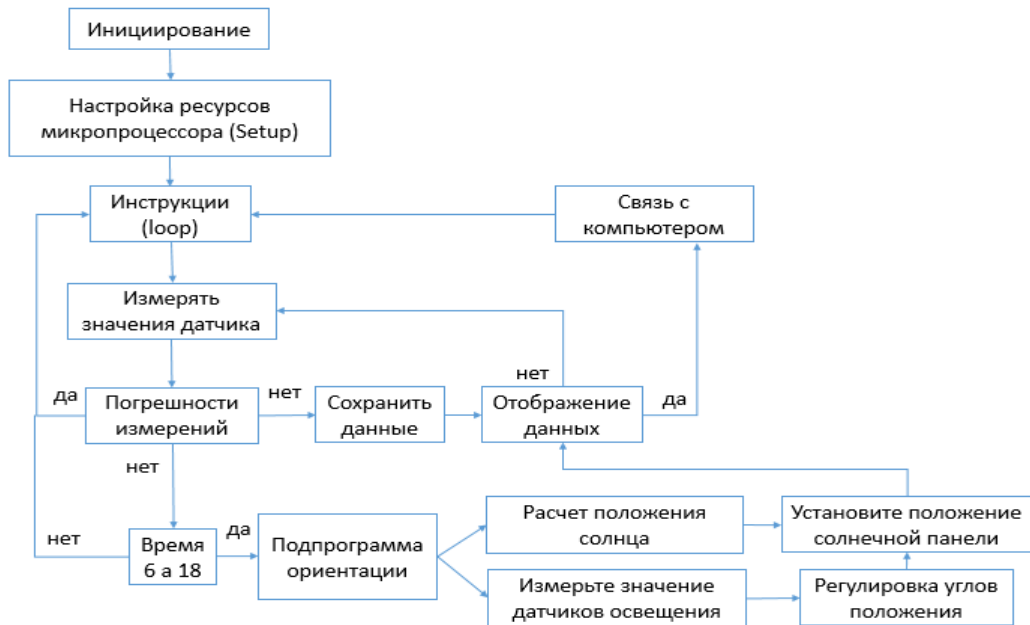


Рисунок 3.3.3 – Блок-схема экспериментальной модели

Структура эксперимента показана ниже (см. рисунок 3.3.4):

В таблице А.10 (Приложение А) приведены технические характеристики каждого из датчиков, применяемых в эксперименте.

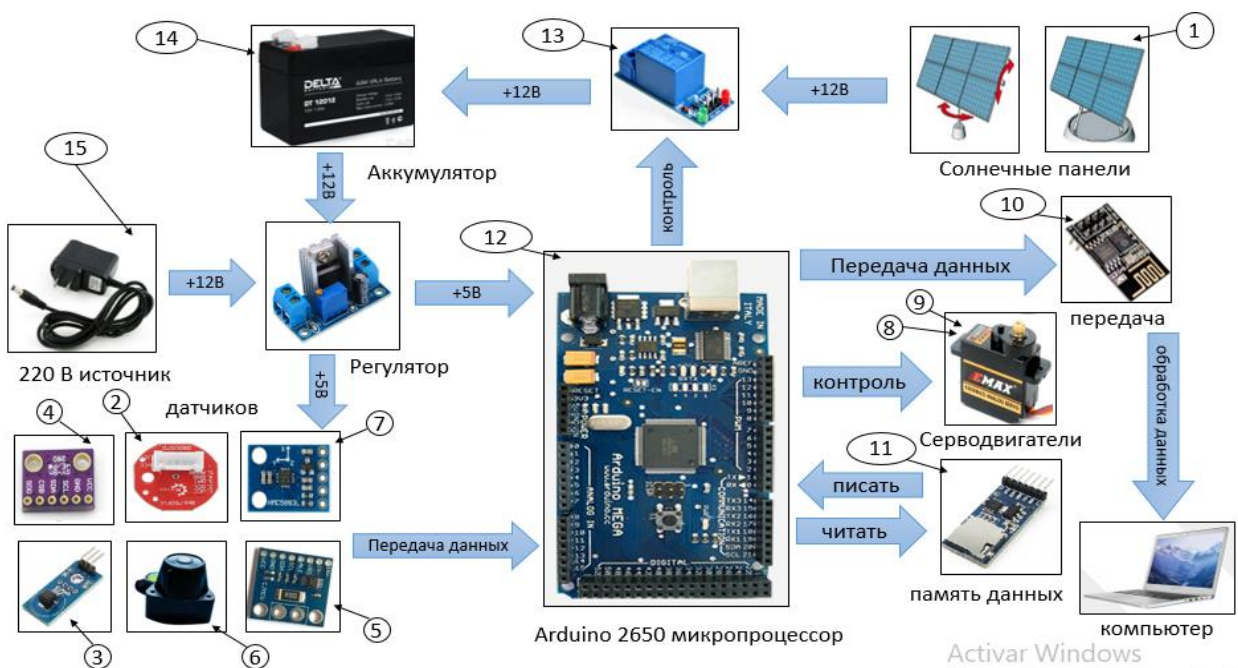


Рисунок 3.3.4 – Блок схема экспериментальной системы

На рисунке 3.3.4 приняты обозначения: 1 – солнечная панель малой мощности; 2 – датчик солнечного света; 3 – датчика рабочей температуры; 4 – датчик температуры окружающей среды, атмосферного давления и относительной влажности; 5 – датчик напряжения и тока; 6 – датчик солнечного излучения; 7 – цифровой компас; 8 – серводвигателей для горизонтального поворота; 9 – серводвигателей для вертикального поворота; 10 – модуль связи Wi-Fi; 12 – микропроцессор; 13 – реле подключения; 14 – аккумулятор 15 – внешний источник питания.

Результаты экспериментальных исследований представлены в таблице А.12 (Приложение А).

Для более наглядного сравнения полученных данных были построены графические зависимости, представленные на рисунке 3.3.5. Кривая синего цвета – результат, полученный при статической установке фотоэлектрического модуля, кривая красного цвета – результат, полученный при использовании двухосной системы слежения. Эксперимент проводился с одними и теми же фотоэлектрическими панелями.

Из результатов эксперимента видно, что в среднем величина улавливаемого солнечного излучения выше на 17% при использовании системы слежения за Солнцем, чем при фиксированном расположении солнечных панелей.

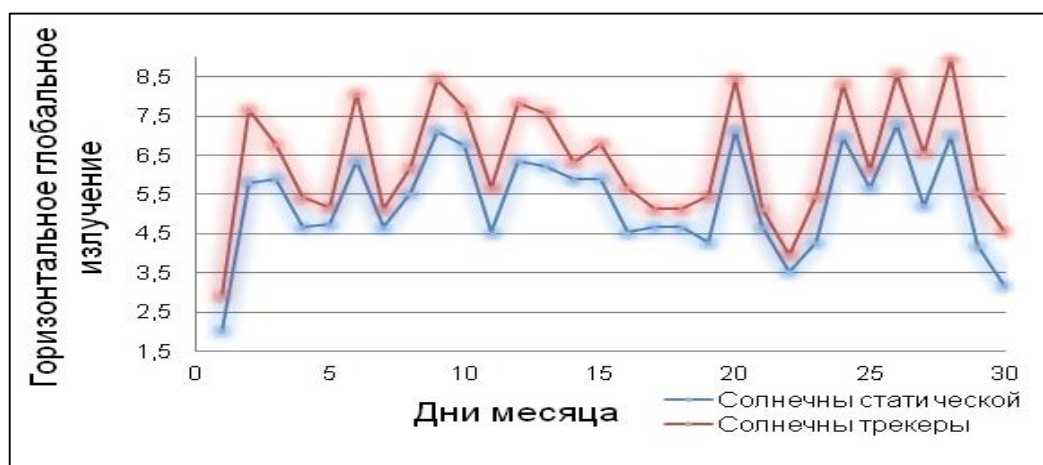


Рисунок 3.3.5 – Сравнение горизонтального глобального излучения стационарной системы и системы с функцией слежения

### 3.3.2 Структура и функционирование программного обеспечения, разработанного для обработки данных

С разработкой экспериментальной модели для изучения солнечных систем в соответствии с конкретными климатическими условиями региона возникла необходимость в разработке программного обеспечения, способного обрабатывать данные, полученные из этой модели.

Программное обеспечение было разработано в среде `guide/matlab`, интерактивной платформе, где возможно программировать в визуальной среде и показывать результаты [Свидетельство № RU 2020615141, Приложение Б]. Программа выполняет обработку всей информации, собранной в файле данных экспериментальной модели.

Разработанная программа имеет два способа работы (см. рисунок 3.3.6):

1. Программа может работать в режиме реального времени через USB - соединение с экспериментальной моделью, где могут быть занесены различные переменные, представляющие интерес для систем слежения и стационарных систем солнечной энергии.

2. Программа может работать с файлом данных, который экспериментальная модель хранит в своей памяти, и после загрузки на компьютер она может быть импортирована в программное обеспечение и выполнять соответствующие анализы для каждой переменной исследования солнечных систем стационарных или систем слежения.

После выбора режима работы программы можно сделать несколько расчетов, а также графики нескольких представляющих интерес переменных в зависимости от времени.

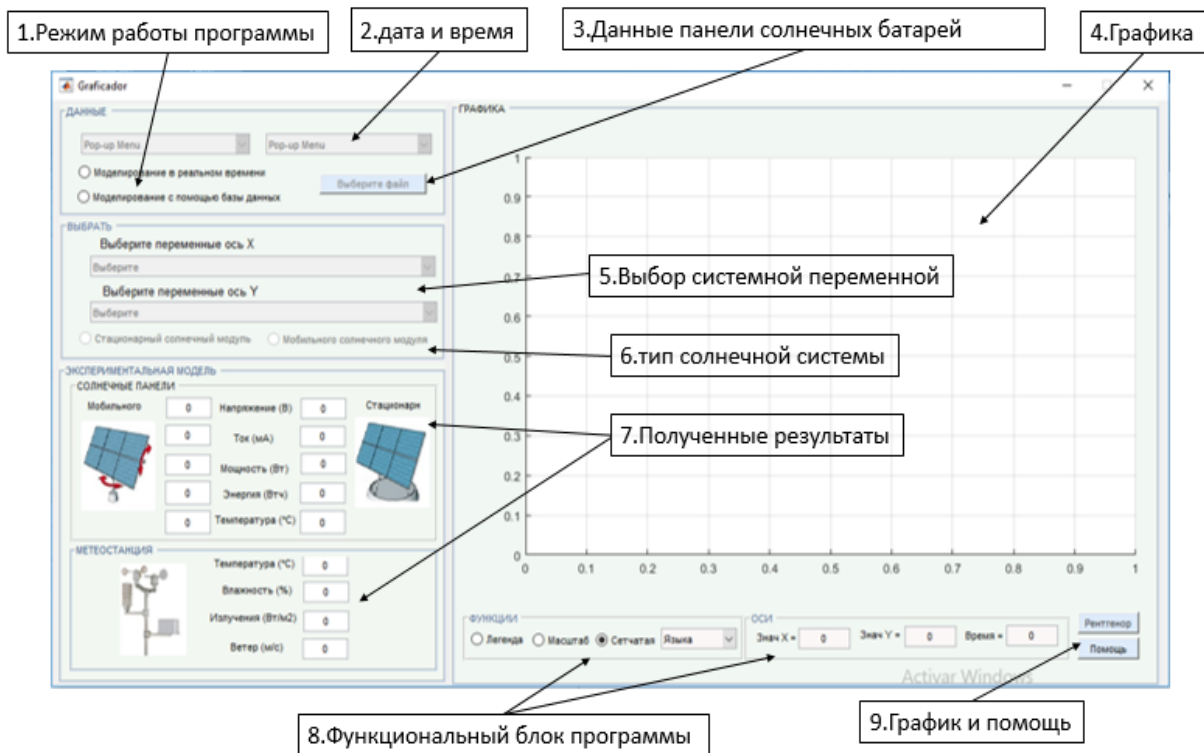


Рисунок 3.3.6 – Программа обработки данных в Guide / Matlab для экспериментальной модели

Далее представлены выполняемые функции:

1. Составляет графики всех переменных, измеренных экспериментальной моделью.
2. Выполняет расчет погрешности разных датчиков экспериментальной модели.
3. Рассчитывает и отображает результаты и графики основных переменных системы солнечного слежения и стационарных систем.
4. Показывает атмосферные значения, измеренные экспериментальной моделью.
5. Рассчитывает вольтамперные характеристики и характеристики электрической энергии каждого солнечного модуля обеих систем и сравните их.

С развитием этого вычислительного инструмента обработка данных, полученных экспериментальной моделью, выполняется быстрее и проще. На основании этого результата был получен патент программы ЭВМ (Номер и дата поступления заявки: 2020613791 03.04.2020).

### 3.4 Определение факторов, влияющих на точность прогноза генерации электрической энергии

Было проведено корреляционное исследование, которое позволило обнаружить связь между различными переменными. Затем был рассчитан коэффициент Пирсона для каждой из выбранных переменных. Коэффициент Пирсона (P) был рассчитан с помощью статистической программы Minitab (версия 18.0) и Matlab (версия R2018a). Результаты, полученные в обеих программах, показаны на рисунке 3.4.1.

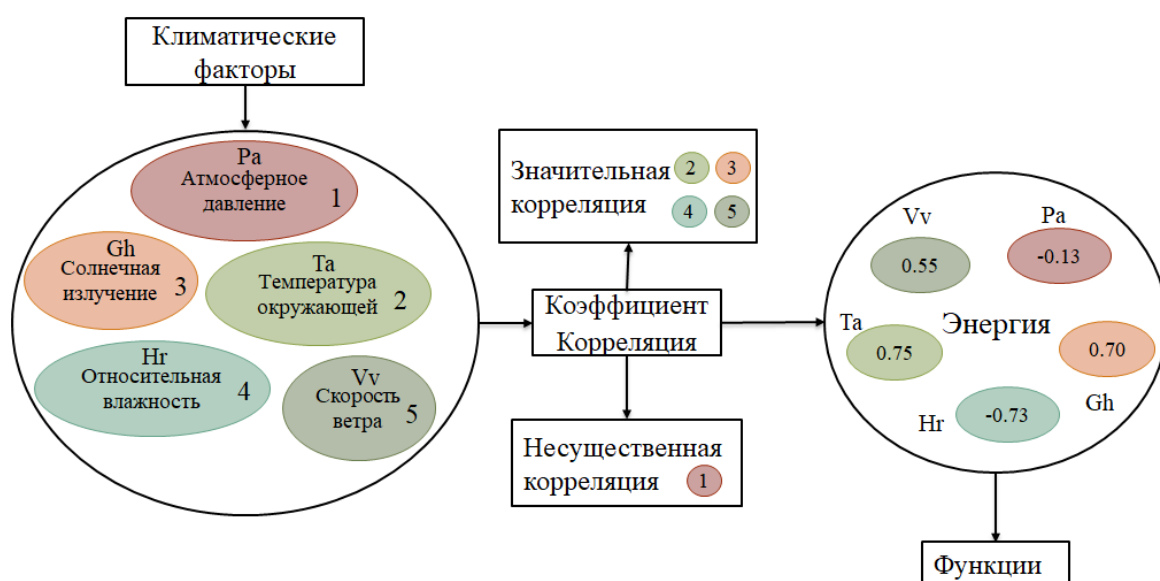


Рисунок 3.4.1 – Определение корреляции климатических переменных с энергией, производимой комплексами с солнечными модулями для региона Сантьяго-де-Куба, в Республике Куба

На рисунке 3.4.1 показано, что:

1. Результаты корреляции между переменными, найденными в обеих программах, одинаковы.
2. Существует 4 метеорологических переменных с большей корреляцией с электрической энергией солнечной системы, солнечной радиацией, температурой окружающей среды и относительной влажностью и в меньшей степени скоростью ветра.

3. Существует прямая связь между солнечным излучением и температурой окружающей среды с энергией, что означает, что они прямо пропорциональны.
4. Существует обратная корреляция между относительной влажностью и энергией, что означает, что они обратно пропорциональны.
5. Атмосферное давление имеет очень низкую корреляцию с электрической энергией, поступающей от солнечной системы.

Используя метод PCA (см. раздел 2.2.2), коэффициент AP (%) был рассчитан в программе Minitab (см. таблицу 3.3), которая содержит процент от общей дисперсии, которая в свою очередь объясняет каждый основной компонент изучаемой зависимой переменной.

Первый главный компонент положительно коррелирует с этими двумя переменными. Следовательно, увеличение значений солнечной радиации и температуры окружающей среды увеличивает значение первой главной составляющей. Первые два основных компонента объясняют 79% вариации данных (см. таблицу 3.4). Поэтому было решено использовать эти компоненты для анализа оценки энергии, производимой фотоэлектрической системой.

Таблица 3.3 – Анализ собственных значений и собственных векторов корреляционной матрицы

|                        |        |        |        |        |        |        |
|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Стандартное отклонение | 3,5797 | 1,1355 | 0,6465 | 0,3084 | 0,2463 | 0,0836 |
| Доля дисперсии         | 0,597  | 0,189  | 0,108  | 0,051  | 0,041  | 0,014  |
| Кумулятивная доля      | 0,597  | 0,786  | 0,894  | 0,945  | 0,986  | 1,000  |

Первый главный компонент составляет 60% от общей дисперсии. Переменные, которые наиболее коррелируют с первым главным компонентом (PC1), – это солнечная радиация ( $G_h = 0,451$ ) и температура окружающей среды ( $T_a = 0,488$ ) (см. таблицу 3.4).

Таблица 3.4 – Основным компонентам

| Переменная                 | PC1    | PC2    | PC3    | PC4    | PC5    | PC6    |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| $T_a$ (°C)                 | 0,488  | 0,076  | 0,283  | 0,367  | 0,067  | -0,732 |
| $V_V$ (м/с)                | 0,322  | -0,398 | -0,813 | 0,208  | 0,185  | -0,020 |
| $H_r$ (%)                  | -0,482 | -0,135 | -0,247 | -0,476 | -0,073 | -0,676 |
| $G_h$ (Вт/м <sup>2</sup> ) | 0,451  | 0,233  | 0,014  | -0,672 | 0,537  | 0,042  |
| $P_a$ (бар)                | -0,037 | 0,868  | -0,444 | 0,128  | -0,169 | -0,057 |
| $\Xi$ (кВт)                | 0,470  | -0,100 | -0,038 | -0,356 | -0,800 | 0,036  |

На рисунке 3.4.2 показаны результаты, полученные с помощью модели PCA.

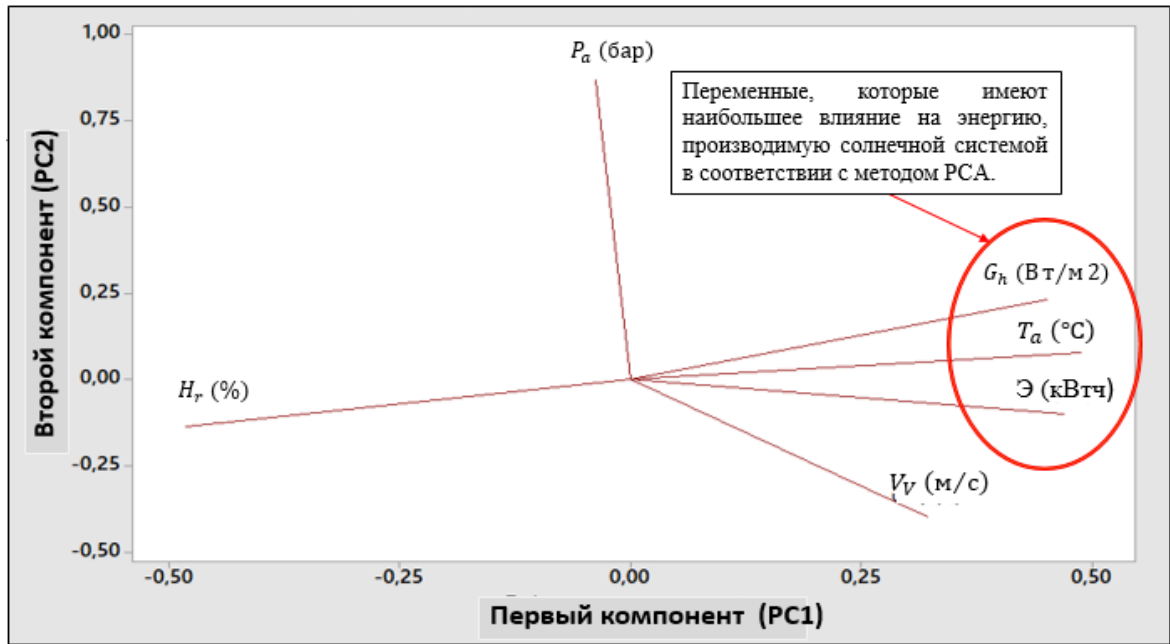


Рисунок 3.4.2 – Переменные климата, оказывающие наибольшее влияние на энергию, вырабатываемую солнечной системой (по методу PCA)

На основании результатов, полученных с помощью модели PCA, известно, что анализ извлечения энергии, генерируемой солнечной системой, зависит от температуры окружающей среды и солнечной радиации. С другой стороны, для проверки результатов, полученных с помощью модели PCA, был проведен следующий анализ.

Уравнения поверхности отклика были определены для оценки энергии, генерируемой системой мощностью 2.5 МВт, с учетом 2, 3, 4 и 5 климатических факторов (см. рисунок 3.4.3). Затем определяли коэффициент детерминации каждой функции, полученной в статистической программе Minitab, и выбирали функцию, которая имела наивысший коэффициент детерминации  $R^2$  (см. таблицу А.11, Приложение А).



Рисунок 3.4.3 – Определение уравнений поверхности отклика и коэффициента детерминации  $R^2$

На основании произведенных расчетов можно сделать следующие выводы:

1. Для определения изменения генерируемой солнечной электростанцией энергии, при учете 5 изученных метеорологических переменных (скорость ветра, относительная влажность, температура окружающей среды, солнечное излучение, атмосферное давление), используемая модель объяснит только  $R^2 = 0.58$  отклика.

2. Если учитывать 4 метеорологические переменные (скорость ветра, относительная влажность, температура окружающей среды, солнечное излучение), используемая модель объяснит только  $R^2 = 0.67$  отклика.

3. Если учитывать 3 метеорологические переменные (скорость ветра, температура окружающей среды, солнечное излучение), используемая модель объяснит только  $R^2 = 0.85$  отклика.

4. Если учитывать только 2 метеорологические переменные (температура окружающей среды, солнечное излучение), используемая модель объяснит только  $R^2 = 0.86$  отклика.

Проведенный факторный анализ по критерию коэффициента детерминации показал, что для выбранных климатических условий достаточно учитывать два фактора: солнечное излучение и температуру окружающей среды, при этом коэффициент детерминации принимает максимальное значение и равен 0,86 (см. таблицу 3.6).

На основании полученных результатов, было найдено уравнение поверхности отклика для двух факторов, а именно для двух независимых

переменных и одной зависимой переменной, с использованием программного обеспечения Minitab 18.

$$\dot{E} = 132 - 24.8 * T_a + 4.09 * G_h. \quad (3.4.1)$$

На основании расчетов был получен коэффициент детерминации  $R^2$  равный 0.86, и ошибка  $S$  составила 3.73.

Результаты говорят о том, что уравнение 3.4.1 (солнечное излучение и температура окружающей среды) имело наилучший отклик при оценке энергии, поставляемой установленной солнечной энергосистемой мощностью 2.5 МВт, с учетом моделирования системы Matlab 2.5 МВт за октябрь 2018 г. показал выработку энергии 3.3 ГВтч, а поверхностная энергия реакции оценила выработку энергии в 3.38 кВтч при разнице в 0,8 ГВтч.

### 3.5 Выводы по третьей главе

Согласно результатам, полученным в результате проведенного исследования, при оценке энергии, производимой солнечной системой мощностью 2.5 МВт статистическими методами, можно утверждать, что:

1. Существует 4 метеорологических переменных с большей корреляцией с электрической энергией солнечной электростанции, солнечной радиацией, температурой окружающей среды и относительной влажностью и в меньшей степени скоростью ветра (см. рисунок 3.4.1).

2. Существует обратная корреляция между относительной влажностью и энергией, что означает, что они обратно пропорциональны.

3. Атмосферное давление имеет очень низкую корреляцию с электрической энергией, поступающей от солнечной системы (см. рисунок 3.4.1).

Это подтверждает тот факт, что атмосферное давление мало или почти не влияет на энергетические показатели фотоэлектрических систем

4. При оценке энергии системы достаточно учитывать только две метеорологические переменные (температуру окружающей среды и солнечную радиацию), поскольку обе объясняют более 86% отклика системы.

5. Существует прямая связь между солнечным излучением и температурой окружающей среды с энергией, что означает, что они прямо пропорциональны (см. рисунок 3.4.1)

6. Данные исследований по горизонтальной радиации показывают, что солнечная радиация, улавливаемая солнечной панелью, может быть увеличена путем внедрения более передовых технологий, таких как системы отслеживания наиболее яркого объекта, поскольку это увеличит количество вырабатываемой электроэнергии на 30%.

7. Установлено, что солнечные системы слежения являются альтернативным способом повышения эффективности улавливания и дальнейшего преобразования солнечного излучения на фотоэлектрических электростанциях в Республике Куба.

## **ГЛАВА 4 ТЕХНИКО–ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В СИСТЕМАХ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ**

В предыдущих главах были определены зависимости климатических факторов и выработки электрической энергии солнечной электростанцией в регионе Сантьяго-де-Куба. Было определено, что в зависимости от сезонности, значимыми являются от 2 до трех климатических параметров – температура окружающей среды, иррадиация и скорость ветра, в то время как влажность и давление в исследуемом регионе не влияют на выработку энергии. Было выявлено, что наилучшего результата можно достичь, если рассчитывать энергию, вырабатываемую солнечной электростанцией, как функцию от 2 переменных.

Ранее были представлены основные технические проблемы, отсутствие решения которых привело к неэффективному производству энергии с помощью солнечных генераторов на солнечной электростанции Сантьяго-де-Куба в Республике Куба.

Также в предыдущих главах было проведено математическое, статистическое и компьютерное моделирование солнечной электростанции и всех ее компонентов. Моделирование подтвердило выдвинутые предположения о том, что необходимо учитывать климатические параметры региона при проектировании, модернизации электростанций с фотоэлектрическими модулями.

Однако, в диссертационной работе было выдвинуто предположение, что необходимо также учитывать социально-экономические факторы при выборе типа модернизации или проектирования. К социально-экономическим факторам относятся экономические ограничения региона, связанные с возможностями экономических вложений на модернизацию электроподстанции в исследуемом регионе. Также необходимо оценивать влияние производства электрической энергии с помощью солнечной электростанций прямого преобразования, замещающей производство электрической энергии традиционными способами, на экологическую обстановку региона.

Поэтому в текущей главе будет представлен разработанный алгоритм выбора типа модернизации солнечной электростанции, в основу которого положена сформированная функция зависимости вырабатываемой подстанцией энергии от указанных ограничений. Также представлены результаты, доказывающие позитивное влияние использования солнечной энергетики в Республике Куба на экологическую обстановку, а именно на снижение выбросов углекислого газа в атмосферу.

Целью исследований, представленных в текущей главе, является экономическая оценка различных вариантов производства электроэнергии с использованием солнечных панелей с системами слежения за Солнцем и со стационарными системами, выявление коэффициентов, ограничивающих модернизацию, определение зависимости способа модернизации от экономических ресурсов региона. Для этого было решено использовать текущую стоимость оборудования для расчета первоначальных затрат. Инвестиции были определены как все экономические компоненты, необходимые для проведения модернизации солнечного генератора на солнечной станции Сантьяго-де-Куба.

#### **4.1 Расчет экономической привлекательности применения фотоэлектрической станции с солнечным слежением**

Сегодня солнечные технологии используют для получения тепла, электричества, света и т. д. для коммунально-бытовых потребителей и промышленных предприятий. Запасы природного газа, угля и нефти истощаются, классические способы получения энергии источников оказывают негативное воздействие на окружающую среду. Это стало причиной необходимости инвестирования в возобновляемые источники энергии, которые в будущем приведут к получению энергии без деградации окружающей среды.

Для оценки экономической эффективности систем солнечного мониторинга в Кубинской Республике была внедрена технико-экономическая модель.

Техническая оценка касается всего, что связано с производительностью системы генерации солнечной электростанции мощностью 2,5 МВт в провинции

Сантьяго-де-Куба, всеми техническими показателями, эффективностью (см. раздел 4.1.1).

Ранее в главе 3 была проведена техническая оценка солнечного генератора, который в настоящее время работает на электростанции мощностью 2,5 МВт, где были выявлены основные причины, влияющие на максимальную производительность солнечного генератора. Основной причиной низкой производительности электроэнергии рассматриваемой электростанции – солнечные модули.

Таким образом, в данной главе будут представлены несколько способов модернизации. Модернизация солнечной электростанции нацелена на решение двух основных задач. Первая задача заключается в сохранении текущей технической структуры солнечного генератора, но с учетом более эффективных солнечных панелей. Вторая задача заключается в конструкции новой электростанции, с системами слежения за солнцем на базе уже имеющихся фотоэлектрических модулей. Также будет рассмотрено еще 2 типа модернизации – замена текущих солнечных панелей на панели с большим КПД и конструирование системы слежения за Солнцем; полная реконструкция солнечной электростанции, включающая в себя замену не только основных компонент, но и инверторов и трансформатора.

Для выполнения экономической оценки способа модернизации было принято получение эффективного соотношения экономического эффекта (результата) и затрат под влиянием этого результата. Очевидно, что чем меньше затраты и чем выше значение результатов производства, тем выше экономическая эффективность.

В данной главе входными параметрами, отвечающие за экономическую оценку солнечной электростанции являются данные о стоимости оборудования (например, стоимость фотоэлектрических модулей, стоимость инвертора(ов), электрооборудование и т.д.). Расходы на транспортировку и монтаж фотоэлектрической станции определяются также в этом разделе.

Финансовые показатели также включают ставку дисконтирования (при которой солнечная электростанция будет рассчитываться), коэффициент задолженности, уровень налогообложения и государственных или иных субсидий. Кроме того, стоимость, по которой произведенная энергия будет продаваться, темп роста энергетики, национальной инфляции и ожидаемого срока эксплуатации фотоэлектрической установки также учитывается при расчетах.

Наиболее часто используемые экономические показатели для оценки экономической привлекательности проекта является средняя цена энергии.

Как упоминалось выше, будут учтены экономические последствия модернизации солнечного генератора, а также всего оборудования, составляющего электростанцию мощностью 2,5 МВт в провинции Сантьяго-де-Куба.

#### **4.1.1 Техническая информация**

Сегодня идет активный поиск новых способов и устройств, а также путей повышения продуктивности существующих технологий, позволяющих максимально эффективно преобразовать энергию Солнца в электрическую энергию.

Основными известными способами повышения эффективности солнечных панелей являются:

1. Разработка прогрессивных технологий изготовления фотоэлементов, направленных на уменьшение их стоимости и увеличение КПД;
2. Применение систем слежения за Солнцем.

Первый способ напрямую связан с разработкой новых технологических решений создания материалов и комбинирования различных полупроводниковых материалов, способных улавливать различный спектр. Например, в работе [119], повышение КПД фотоэлектрического модуля достигается путем создания многослойных панелей, так называемых гетероструктур. В работе [111] описано применение тонких пленок для двухсторонних кремниевых солнечных элементов. Ко второму способу относятся технические решения использования систем

слежения за Солнцем, концентраторов солнечного излучения, одним словом, компонентный состав оборудования, входящий в солнечную электростанцию.

В следующих разделах оба варианта будут учтены при модернизации солнечного генератора электростанции мощностью 2,5 МВт в провинции Сантьяго-де-Куба.

#### 4.1.1.1 Анализ рынка солнечных панелей

В настоящее время солнечная электростанция мощностью 2,5 МВт в провинции Сантьяго– де– Куба, из которой состоит солнечный генератор, состоит из 10400 солнечных панелей (см. раздел 2.2.1), каждая из которых имеет мощность 240 Вт с КПД 16% (ДСМ-240-С).

Для реализации первой технической задачи была определена выборка из 10 различных солнечных модулей с более высоким КПД, которые можно использовать для замены текущего солнечного модуля ДСМ-240-С. В таблице 4.1 представлены основные параметры, а также стоимость солнечных панелей.

Таблица 4.1– Выборка солнечных модулей для проектирования нового солнечного генератора на электростанции мощностью 2,5 МВт

| N  | Модель          | мощность (Вт) | КПД (%) | Технология | Стоимость (€/Вт) | Стоимость панели (€) | Страна-экспортер |
|----|-----------------|---------------|---------|------------|------------------|----------------------|------------------|
| 1  | SKT375M6-20/AB  | 320           | 19.7    | Монокр     | 0.195            | 62.4                 | Китай            |
| 2  | HCM60X9-345W    | 345           | 20.4    | Монокр     | 0.2              | 69                   | Испания          |
| 3  | MS400PM5-66SA   | 400           | 21.3    | PERC       | 0.198            | 79.2                 | США              |
| 4  | AE M6-60 320W   | 320           | 19.24   | PERC       | 0.185            | 59.2                 | Германия         |
| 5  | UZ158MHC340-60  | 340           | 20.1    | Монокр     | 0.159            | 54.06                | Китай            |
| 6  | SR-325-340-120M | 340           | 20      | Монокр     | 0.181            | 61.54                | Германия         |
| 7  | EX340M-120      | 340           | 20.1    | Монокр     | 0.198            | 67.32                | Испания          |
| 8  | ASP345P6-72     | 345           | 17.8    | Поликр     | 0.176            | 60.72                | Германия         |
| 9  | NS-290P6        | 290           | 17.8    | Поликр     | 0.152            | 44.8                 | Китай            |
| 10 | SP360-120M      | 360           | 19.46   | PERC       | 0.190            | 68.4                 | Китай            |

Выбор модулей, представленных в таблице 4.1, зависит от входных электрических характеристик напряжения и тока инвертора, который работает на электростанции мощностью 2,5 МВт (см. Раздел 2.1.1).

Расчёт количества электроэнергии, получаемой от фотоэлектрических панелей, производится согласно выражению:

$$E_r = P_{pv} * HS * 0.9, \quad (4.1)$$

где:  $E_r$  – Реальная энергия, поставляемая солнечной панелью (кВтч);  $f_{pv}$  – Эффективность панели (%);  $P_{pv}$  – Номинальная мощность панели (Вт);  $HS$  – часы солнечного света в течение месяцев (см. рисунок 2.1.1.3).

В таблице 4.2 показано фактическое годовое производство энергии для каждой модели солнечного модуля, представленных в таблице 28. В таблице также показано количество солнечных модулей на каждую модель, которые необходимы, а также денежную стоимость в евро для замены нынешнего генератора электростанции мощностью 2,5 МВт в Сантьяго-де-Куба.

Таблица 4.2 – Экономическая эффективность панелей

| Панели  | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Количество панелей                            | 7814 | 7247 | 6251 | 8068 | 7354 | 7440 | 7453 | 7190 | 8622 | 6945 |
| Общая стоимость тысяч (€)                     | 488  | 500  | 495  | 478  | 398  | 458  | 502  | 437  | 380  | 475  |
| Общая энергия в год (МВтч)                    | 656  | 707  | 820  | 635  | 697  | 689  | 688  | 713  | 594  | 738  |
| Отношение годовой энергии к затратам (МВтч/€) | 1,34 | 1,41 | 1,66 | 1,33 | 1,75 | 1,50 | 1,37 | 1,63 | 1,56 | 1,55 |

Энергия, поставляемая солнечными модулями за каждый месяц, показана в таблице А.13 (Приложение А).

Для модернизации статического генератора электростанции мощностью 2,5 МВт будет выбран солнечный модуль модели UZ158MHC340-60 китайского производства, так как он предлагает лучшее соотношение экономических затрат и энергии, чем у других модулей, представленных в таблице 4.1. На рисунке 4.1 показаны результаты расчетов отношения эффективности и стоимости производства 1 кВтч для каждой из панелей, представленных в таблице 4.2. Замена существующего модуля на модуль UZ158MHC340-60 является оптимальных, поскольку стоимость 1 кВтч с этой солнечной батареей будет стоить 0,078 €/кВтч при КПД 20,1%. Согласно полученным результатам, модуль

MS400PM5-66SA имеет КПД 21,3% и является более эффективным, по сравнению с выбранным, однако стоимость 1 кВтч выше и составляет 0,097 €/кВтч.

Таким образом первым параметром, влияющим на компонентный состав электротехнического комплекса, является отношение экономических затрат на модернизацию к вырабатываемой модулем энергии-КЭ. Для модернизации солнечного генератора необходимо выбирать солнечную панель с лучшим коэффициентом энергоэффективности по сравнению со стоимостью генерируемого 1 кВтч.

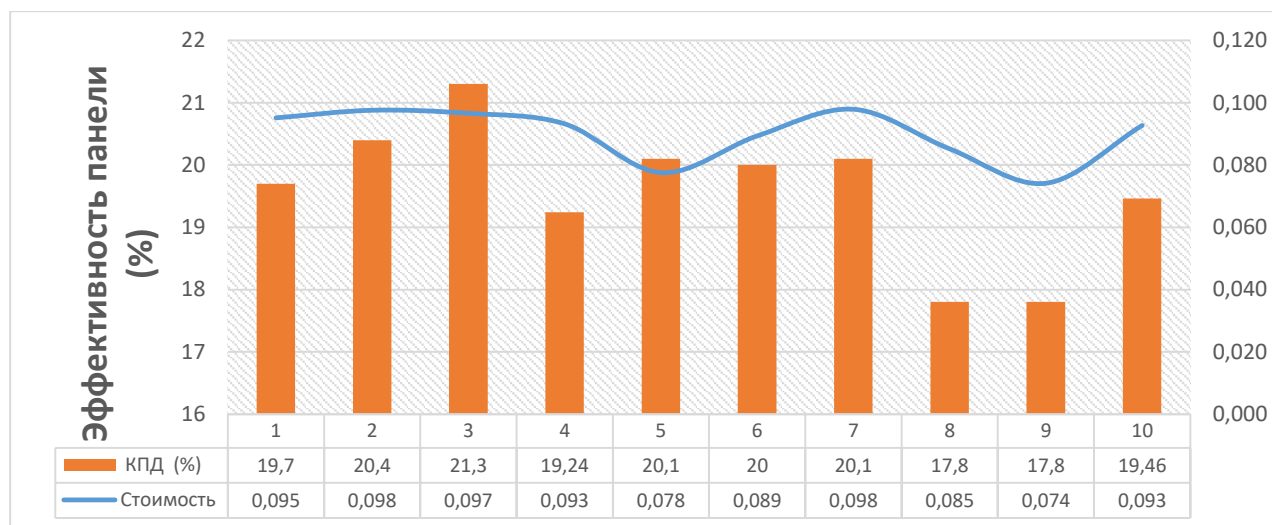


Рисунок 4.1 – Соотношение стоимости (€/ кВтч ) продукции к КПД различных моделей солнечных панелей

Помимо улучшения структуры генератора, которая заключается в увеличении КПД панелей, вторым положительным фактором является уменьшения числа самих модулей. Всего солнечных модулей будет использоваться на 3046 единиц меньше и будет составлять 7354 единиц. Такого числа модулей будет достаточно чтобы обеспечивать то же количество генерируемой энергии ежегодно. Это доказывает, что замена солнечных модулей с меньшим электрическим КПД с 16% для модулей с более высоким электрическим КПД с 20,1% является целесообразной.

### 4.1.1.2 Выбор оптимального решения для модернизации

После определения модели и количества необходимых солнечных модулей определяется необходимое расстояние для каждой группы металлических опор, на которой будут устанавливаться солнечные панели. На рисунке 4.2 показана схема установки солнечных панелей.

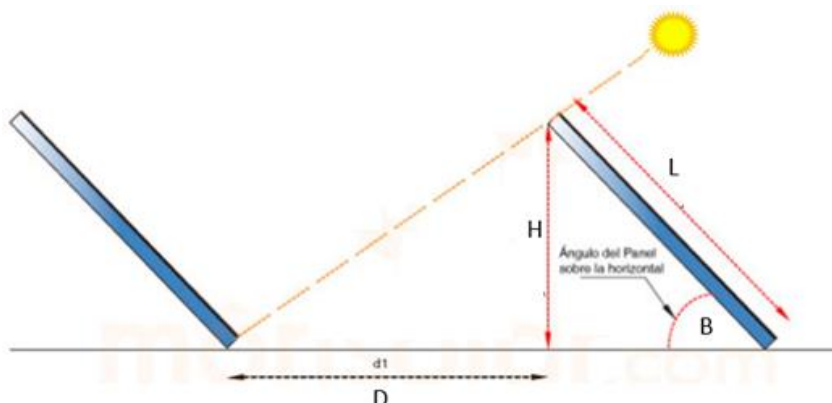


Рисунок 4.2 – Положение опор солнечного генератора солнечной электростанции мощностью 2,5 МВт

Таблица 4.4 – Актуальные данные опор солнечного генератора

| Длина платформы ( $L$ ) | Высота платформы ( $H$ ) | Наклон платформы ( $\beta$ ) | Расстояние между генераторами ( $D$ ) |
|-------------------------|--------------------------|------------------------------|---------------------------------------|
| 6.6 метр                | 2.5 метр                 | 20 градусов                  | 2 метр                                |

Высота и расстояние между генераторами определяется как:

$$H = L * \text{sen}(\beta); \quad (4.2)$$

$$D = \frac{H}{\tan(61 - \varphi)}, \quad (4.3)$$

где:  $D$  – расстояние между фотоэлектрическим генераторами (м);  $H$  – высота фотоэлектрического генератора (м);  $\beta$  – угол наклона обращенных на юг фотоэлектрических генераторов (градусы).

Согласно расчетам, полученным по уравнению 4.3, минимальное расстояние, на котором должны располагаться генераторы составляет 2,8 метра ( $D_2 = 2.8$  м), в настоящее время генераторы находятся на расстоянии приблизительно 2 метра ( $D_1 = 2$  м). Такое расположение вызывает частичное

затенение поверхности солнечных модулей в декабре, так как солнечная высота является минимальной в этот период времени года для региона Сантьяго- де - Куба, в Республике Куба. И как следствие затенение солнечного модуля приводит к снижению вырабатываемой энергии.

В заключение можно констатировать, что техническое решение замены солнечной панели модели ДСМ-240-С (КПД 16%) с низким КПД на фотоэлектрический модуль UZ158МНС340-60 (КПД 20%) с более высоким КПД является достаточным для выработки той же энергии ежегодно 5.12 ГВтч (см. таблицу 4.5).

Таблица 4.5 – Сравнение текущего генератора с предлагаемой конструкцией

| Характеристики                                | Текущий солнечный генератор. (ДСМ– 240– С) | Предлагаемый солнечный генератор. (UZ158МНС340– 60) |
|---|--|---|
| Пиковая мощность (кВт)                        | 2496.0                                     | 2500.0  |
| Количество солнечных модулей                  | 10400                                      | 7354  |
| Эффективность солнечных модулей (%)           | 16   | 20  |
| Стоимость (€)                                 | ---  | 478000  |
| Годовое производство энергии (ГВтч)           | 3.8  | 4.1   |
| Расстояние между каждым генератором ( $D_2$ ) | 2  | 3   |

#### 4.1.1.3 Конструкция солнечного генератора с системой слежения за Солнцем

В предыдущем разделе были показаны технические критерии (первое техническое решение: замена солнечных модулей на другие более эффективные модели) для увеличения генерирующей мощности электростанции 2,5 МВт. В этом разделе будет представлен второй предлагаемый технический вариант (конструкция системы слежения за Солнцем).

Принимая во внимание текущую конфигурацию и схему подключения солнечных инверторов, а также места установки силовых трансформаторов,

проектирование генератора будет выполняться с учетом этих фактов. В предыдущем разделе было выявлено необходимое количество солнечных модулей (модель UZ158MHC340-60, 7354 единицы) для достижения первоначальной проектной пиковой мощности солнечной электростанции равной 2,5 МВт.

Для расчета минимального расстояния между трекерами используется критерий-полдень зимнего солнцестояния, который является наихудшем случаем, поскольку наблюдается максимальное затенение поверхностей модулей. Для этого принято расположение модулей, указанное на рисунке 4.3.

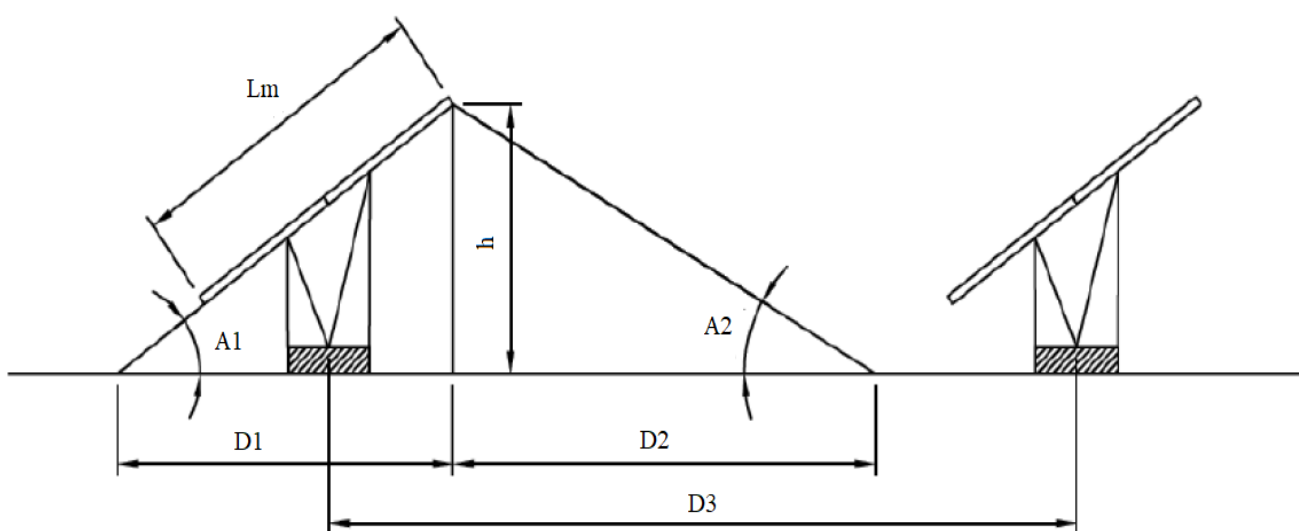


Рисунок 4.3 – Расположение опор солнечного генератора с солнечным трекингом солнечной электростанции мощностью 2,5 МВт

Где:  $L_m$  – Длина комплекта фотоэлектрических модулей (м);  $A_1$  – Наклон фотоэлектрического модуля относительно горизонтальной плоскости монтаж;  $A_2$  – Минимальная высота Солнца в полдень в день зимнего солнцестояния (21 декабря);  $h$  – высота или вертикальное расстояние между горизонтальной монтажной плоскостью.

Зная склонение Солнца, соответствующее дню с максимальным затенением, которое составляет  $-23,45^\circ$  и широту  $20,22^\circ$  Сантьяго-де-Куба, угол, образованный линиями солнечного излучения с горизонталью, будет равен  $A_2 = 48$  градусов.

Для тригонометрических расчетов конструкция трекера считается на 0,7 м, в этих условиях, исходя из длины  $L_m$  комплекта фотоэлектрических модулей (9 м) и указанных значений  $\alpha$  и  $\beta$ , получаем следующие полученные результаты (см. таблицу 4.6).

Таблица 4.6 – Актуальные данные платформ солнечного генератора

| $L_m$ | h   | $A_1$ | $A_2$ | $D_1$ | $D_2$ | $D_3$ |
|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 9 м   | 8 м | 70°   | 47°   | 5.6 м | 7 м   | 12 м  |

Согласно результатам таблицы 4.6, минимальное расстояние, которое должно быть между конструкциями, отслеживающими солнечный свет, составляет 12 м.

Согласно расчетам, было выявлено что потребуется 68 платформ для мониторинга солнечной энергии, чтобы обеспечить номинальные характеристики мощности нынешней солнечной электростанции мощностью 2,5 МВт. Каждая система мониторинга будет иметь пиковую мощность 36 кВт, что соответствует 2 инверторам по 17 кВА. Соединение между солнечными панелями с учетом входных электрических характеристик инвертора (см. таблицу А.7, приложение А) будет осуществляться с помощью 18 панелей, соединенных последовательно, и 3 групп по 18, соединенных параллельно для каждого инвертора мощностью 17 кВА. С помощью описанного выше типа подключения гарантируется, что соединение между солнечным генератором и солнечным инвертором не превышает уровни входного напряжения и тока солнечного инвертора.

Таблица 4.7 – Электрические и механические характеристики солнечного трекера (Характеристики каждой солнечной платформы слежения)

| Электрические                   |          | Механические      |                 |
|---------------------------------|----------|-------------------|-----------------|
| Параметры                       | Характер | Параметры         | Характер        |
| Поддерживаемая пиковая мощность | 36кВт    | Отслеживание      | 2 оси           |
| Увеличение производства         | 35%      | Тип последователя | двухосный       |
| Азимутальный угол сопровождения | 240°     | Система слежения  | Астральные часы |

Продолжение таблицы 4.7

| Электрические                  |                    | Механические   |                           |
|--------------------------------|--------------------|--|---------------------------|
| Параметры                      | Характер           | Параметры  | Характер                  |
| Угол сопровождения зенита      | 0– 65°             | Привод оси азимута   | Шестерня – Корона         |
| Мощность двигателя             | 750 W              | Привод оси Зенит   | Два механических домкрата |
| Максимальная площадь платформы | 250 m <sup>2</sup> | Двигательная система   | Линейное срабатывание     |
| Степень защиты                 | IP55               | Высота столбца   | 5.5м                      |
|                                |                    | Вес платформы  | 7.930 кг                  |
| Расчетная скорость ветра       |                    | 120 км/ч   |                           |
| Анкеровка к земле и фундаменту |                    | Смешанная бетонно– стальная колонна с железобетонным покрытием 22 м <sup>3</sup> |                           |

С учетом данных, представленных в таблице 1.1 (см. раздел 1.2.3), общая стоимость солнечного трекера мощностью 36 кВт составит 7416 € (по курсу доллар– евро на февраль 2021 г.). В целом для всей солнечной электростанции в Сантьяго-де-Куба экономические затраты составят 504300 €. Следует отметить, выше указана стоимость только самой системы слежения без учета солнечных модулей. В итоге полная стоимость системы с учетом солнечных батарей составляет порядка 902300 €.

Однако, чтобы определить общую стоимость, необходимо принять во внимание расходы на транспортировку, импорт материалов, затраты на строительство, сборку и другие.

#### 4.2 Расчет срока окупаемости и экономический эффект

Экономическая оценка основана на индивидуальных технических параметрах для каждой фотоэлектрической системы. В процессе оценки первоначальные затраты на фотоэлектрические системы и ежегодные денежные потоки в результате работы солнечных электростанций, играют существенную

роль. Экономическая оценка осуществляется с использованием различных финансовых критериев.

Технология фотоэлектрических систем является одной из форм производства возобновляемой энергии, которая стремительно развивается во всем мире. Источником для производства энергии является солнечная энергия, поэтому негативное воздействие на окружающую среду незначительное. Поэтому многие страны принимают фотоэлектрические системы как надежную альтернативную форму производства энергии.

Однако, покупка и установка солнечных панелей по-прежнему является дорогостоящим процессом. Затраты на приобретение соответствующего оборудования, особенно фотоэлектрических модулей, могут достигать до 50% от всех первоначальных затрат на строительство солнечной электростанции.

Инвестиции определяются как все экономические компоненты, необходимые для проведения модернизации солнечного генератора на солнечной станции Сантьяго-де-Куба. Этот анализ будет сосредоточен на оценке инвестиций с экономической точки зрения с учетом двух технических решений, предложенных в предыдущем разделе. На основании этого анализа можно будет выявить ограничительные коэффициенты. Данные коэффициенты позволят выявить какой тип модернизации будет оптимальным для условий Республики Куба.

Для оценки экономических последствий модернизации электростанции мощностью 2,5 МВт в провинции Сантьяго-де-Куба будут проанализированы 5 различных сценария.

1. Сценарий 1: Солнечная электростанция без модернизации –  $M_0$ .
2. Сценарий 2: Модернизация стационарного солнечного генератора солнечной электростанции мощностью 2,5 МВт с сохранением инверторов, трансформаторов и других компонентов системы –  $M_2$ .
3. Сценарий 3: Установка системы слежения с текущими фотоэлектрическими модулями модели (ДСМ-240-С) –  $M_3$ .

4. Сценарий 4: Модернизация солнечного генератора с системой мониторинга солнечной энергии солнечной электростанции мощностью 2,5 МВт с учетом других компонентов системы (инверторы, трансформаторы и другие) – М<sub>4</sub>.
5. Сценарий 5: Модернизация солнечного генератора с системой мониторинга солнечной энергии солнечной электростанции мощностью 2,5 МВт с сохранением инверторов, трансформаторов и других компонентов системы – М<sub>5</sub>.

Во всех инвестициях, связанных с фотоэлектрическими системами, основная часть инвестиций предназначена для покупки и установки солнечных панелей, это параметр характеризуется наибольшим экономическим эффектом от инвестиций в солнечные системы. Требуемые первоначальные затраты указаны в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Затраты на эксплуатационное и техническое обслуживание

| Эксплуатационные расходы  | Стоимость (€) | Стоимость (CUP)* |
|---|---------------|------------------|
| Солнечные модули (Сценарий 1)                                     | 504 300       | 14 670 087       |
| Солнечные модули и система слежения за Солнцем (Сценарий 2)       | 902 300       | 26 247 907       |
| Инвертор  | 91 700        | 2 667 553        |
| Электрические трансформаторы                                      | 32 107        | 933 992          |
| Комплексная установка с системой слежения за солнцем (Сценарий 3) | 1 026 107     | 29 849 510       |
| Установка и транспортировка                                       | 324 730       | 9 446 400        |
| Обслуживание устройства (Сценарий 0)                              | 0             | 0                |
| Обслуживание устройства (Сценарий 1)                              | 2521          | 73 350           |
| Обслуживание устройства (Сценарий 2)                              | 10 000        | 29 000           |
| Обслуживание устройства (Сценарий 3)                              | 13 535        | 393 733          |

Продолжение таблицы 4.8

| Эксплуатационные расходы             | Стоимость (€) | Стоимость (CUP)* |
|--------------------------------------|---------------|------------------|
| Обслуживание устройства (Сценарий 4) | 22 499        | 654 518          |
| Прочие затраты                       | ---           | ---              |
| Суммарная цена (Сценарий 0):         | 0             | 0                |
| Суммарная цена(Сценарий 3):          | 1 744 865     | 50 758 122       |
| Суммарная цена(Сценарий 4):          | 1 877 636     | 54 620 431       |

\*Расчитано по обменному курсу (февраль 2021 г.), где: 1 € эквивалентен 29,09 кубинских песо (1 € =29,09 CUP).

Солнечные батареи не требуют постоянного обслуживания, но время от времени, они требуют внимания на протяжении всего срока службы, который составляет порядка 25 лет. Следует отметить, что в зависимости от расположения солнечных панелей, на их поверхности могут накапливаться листья или грязь. Поэтому необходима периодическая очистка их поверхности. Однако, затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание фотоэлектрических систем производства электроэнергии низкие и составляют от 0,5% до 1,5% в год от первоначальных инвестиционных затрат (Breyer et al, 2009; IEA, 2010c). Заработная плата рассчитывается с использованием среднего значения заработной платы для данной отрасли и с учетом изменения заработной платы по региону. Зарплата для отрасли для персонала из 2 человек составляет 24000 кубинские песо (CUP) ежегодно.

Для дальнейшего расчета необходимо определить показатели, которые подвержены инфляции каждый год. Уровень инфляции-это процент, при котором происходит ежегодное изменение уровня цен на товары и услуги или, как ожидается, произойдет. На рисунке 4.4 представлены темпы инфляции в Республике Куба по годам за последние десять лет. Текущая ставка составляет 5,5 %.

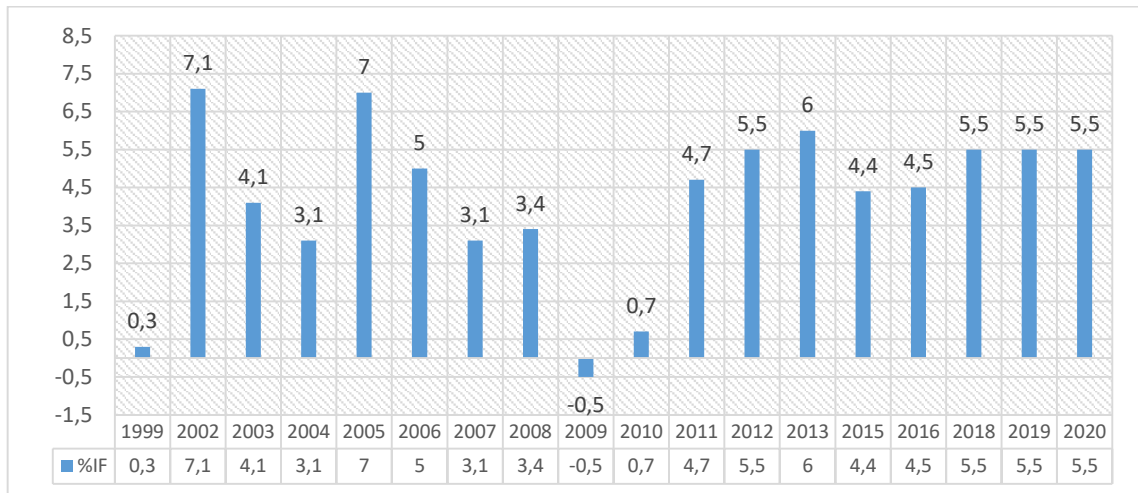


Рисунок 4.4 – Годовой уровень инфляции в Республике Куба

Ставка дисконтирования относится к инвестиционной ставке, используемая для определения текущей стоимости будущих денежных потоков. Она учитывает временную стоимость денег и риск или неопределенность будущих денежных потоков. Центральный банк Кубы устанавливает его на уровне 12% для проектов со сроком возврата капитала 4 года, в соответствии с декретом № 289, статья 5 (Ноябрь 2011 г).

Ставка дисконтирования рассчитывается по следующей формуле:

$$r_{CAPM} = r_f + \rho * (r_m - r_f), \quad (4.4)$$

где:  $r_f$  – это безрисковая ставка, которая определяется из доходности кубинских государственных облигаций, которая в настоящее время;  $r_m$  – ожидаемая доходность рынка – это возвращаения которые инвестор ожидает получить от показателей фондового рынка;  $\rho$  – Коэффициент бета используется для математического описания взаимосвязи между движениями отдельных акций против всего рынка.

Так как проект, разработанный в данной диссертационной работе, является выгодным не только для инвесторов, но и для муниципалитета, администрация области может способствовать получению кредита с меньшей процентной ставкой. В таком случае, доля собственного капитала в структуре капитала составит 70%, а минимальная банковская процентная ставка составляет 6,5%.

Доходы рассчитываются по минимальной цене проектов и прогнозируемого роста. Доход рассчитывается по следующей формуле:

$$C_{\text{доход}} = C_{\text{МИН}} * W * \sum_{n=1}^T (1 + r_i)^n, \quad (4.5)$$

где:  $C_{\text{МИН}}$  – минимальная цена электроэнергии (\$ 0,10 / kWh);  $W$  – выработанная электроэнергия (кВтч);  $r_i$  – ставка роста (%).

Согласно постановлению – закону (РЕЗОЛЮЦИЯ № 435/2017) Министерства энергетики и шахт Республики Куба, стоимость 1 кВтч фотоэлектрической энергии составляла \$ 0,10/кВтч [45]. С другой стороны, по данным экономической комиссии для Латинской Америки и Карибского бассейна (EPAL), ее оценки показывают, что к 2021 году экономический рост в Республике Куба увеличится на 3%.

Для анализа рентабельности инвестиций был использован чистый дисконтированный доход. Для расчета чистой приведенной стоимости чистых денежных потоков и дисконтирования потоков денежных средств, генерируемых в ходе реализации проекта, срок эксплуатации того или иного проекта составляет 25 лет. Так как средний срок службы основного оборудования в системе (солнечные панели, инвертор и т. д.) составляет порядка 25 лет.

ЧДД рассчитывается по следующей формуле:

$$\text{ЧДД} = \sum_{n=1}^T \frac{CF}{(1+r)^t} - C_o, \quad (4.6)$$

где:  $C_o$  – Общие начальные инвестиционные затраты;  $CF$  – (денежный поток) это количественное выражение денег, имеющих в распоряжении организации, для руководителей и собственников компании это план будущего движения денежных фондов предприятия во времени либо сводка данных об их движении в предшествующих периодах, а для инвестора  $CF$  – ожидаемый в будущем доход от инвестиций (с учетом дисконта).

Параметр  $CF$  рассчитывается по следующей формуле:

$$CF = EAT - Depr - Inv. \quad (4.7)$$

Параметр  $DCF$  или метод ДДП (метод дисконтированных денежных потоков) рассчитывается:

$$DCF = CF * (1 + r)^t, \quad (4.8)$$

где:  $t$  –налоговая ставка.

$Tax$  (Налог) рассчитывается по следующей формуле:

$$Tax = t \cdot EBT. \quad (4.9)$$

$EBT$  (прибыль до налогообложения) рассчитывается по следующей формуле:

$$EBT = C_{\text{доход}} - CT, \quad (4.10)$$

где:  $CT$  – Суммарные затраты;  $C_{\text{доход}}$  – Доход.

$EAT$  (прибыль после налогообложения) рассчитывается по следующей формуле:

$$EAT = EBT - Taxes. \quad (4.11)$$

В таблице 4.9 представлены результаты предложенной технико–экономической оценки.

Таблица 4.9 – Результаты технико–экономической оценки

| Тип модернизации | ЧДД (CUP)     | ВНД (%) | PRC (годы) | В/С  |
|------------------|---------------|---------|------------|------|
| $M_0$            | –             | –       | –          | –    |
| $M_1$            | 66.277.188,87 | 16,5    | 2,5        | 10,1 |
| $M_2$            | 83.821.687,02 | 15,7    | 2,7        | 8,8  |
| $M_3$            | 72.191.888,71 | 13,3    | 3,9        | 5,7  |
| $M_4$            | 69.074.820,87 | 12,8    | 4,2        | 5,2  |

PRC – Срок окупаемости вложения технического проекта.

В/С – Соотношение выгод / затрат составляет.

ЧДД – Чистого дисконтированного дохода.

ВНД – Внутренняя норма доходности.

При принятии инвестиционных решений ВНД (внутренняя норма доходности) используется для расчёта ставки альтернативных вложений. При выборе из нескольких проектов с разными ВНД, выбирается проект с максимальным значением ВНД. Для этого исследования, согласно таблице 4.9, лучшими проектами для рассмотрения являются  $M_1$ .

Результаты в таблице 4.9 показывают расчеты параметров ЧДД (чистый дисконтируемый доход) и ВНД для 4 предложенных технических решений. Результаты подтверждают, что все технические решения жизнеспособны, поскольку ЧДД больше 0. Рентабельность любого технического проекта определяется экономическим показателем ВНД. Если этот показатель выше учетной ставки, установленной финансовым банком региона, то можно говорить о прибыльности проекта. Это означает, что три предложенных технических предложения выгодны, поскольку  $\text{ВНД} > 12\%$ . Следует отметить, что все показатели, ранее приведенные в таблице 4.9, были рассчитаны исходя из процентной ставки 6,5%, ставки дисконтирования 12% и инфляции 5,5%.

На основании анализа результатов расчетов (см. таблицу 4.2.2) можно сделать вывод, что 4 сценария модернизации являются прибыльными, однако требуют доработки. Для 1 технического решения, которое заключается в замене всех солнечных модулей модели DCM-240-C с КПД 16% на солнечные модули UZ158MHC340-60 с КПД 20% соотношение прибыли к затратам составляет 10. Это является лучшим из всех предложенных технических решений. Срок окупаемости составляет 2,5 с половиной года.

С другой стороны, внедрение систем солнечного мониторинга для электростанции мощностью 2,5 МВт в провинции Сантьяго-де-Куба также является жизнеспособным предложением ( $\text{ЧДД} > 0$ ) и прибыльным ( $\text{ВНД} = 15\% > 12\%$  ставки дисконтирования). Срок окупаемости составляет 3 года, отношение прибыли к затратам составляет 8,8.

В заключение, принимая во внимание технические и экономические критерии, можно утверждать, что внедрение систем солнечного мониторинга в Республике Куба является экономически целесообразным и с технической точки зрения, так как среднее производство энергии может увеличиваться ежегодно на 30% (см. таблицу 3.1 и раздел 3.3).

Таким образом, на основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований, были получены результаты, представленные в

таблице 4.10. Следует отметить, что на основании экспериментальных исследований и компьютерного моделирования, было выявлено, что для климатических условий Республики Куба, для которых характерно относительно незначительные колебания температуры окружающей среды, облачности, скорости ветра и прочих параметров, следует принимать во внимания два климатических параметра из пяти – солнечное излучение и температуру окружающей среды. Так как именно эти два параметра влияют на рабочую температуру фотоэлектрического модуля. Это объясняется тем, что, несмотря на предположение, что скорость ветра влияет на рабочую температуру фотоэлектрического модуля, для условий Республики Куба, это климатический параметр вносит ошибку в расчет энергии, вырабатываемой модулем. Как было сказано ранее, расчеты производились с учетом сохранения изначальной мощности солнечной электростанции - 2.5 МВт.

Таблица 4.10 – Результаты проведенного экономического анализа

| Тип модернизации | Стоимость модернизации, Э, тыс. Евро (€) | Мощность электростанции, P, МВт | Стоимость 1 кВтч, Э1 | Максимальная энергия, вырабатываемая при идеальных условиях, W0, ГВтч | Энергия, вырабатываемая при учете 2 климатических факторов, W2, ГВтч |
|------------------|--|---------------------------------|----------------------|---|--|
| M0               | 0  | 2.5                             | 0.19                 | 3.6   | 3.30   |
| M1               | 831 551                                  | 2.5                             | 0.24                 | 3.6   | 3.50   |
| M2               | 1 237 000                                | 2.5                             | 0.18                 | 4.45  | 4.37   |
| M3               | 1 745 000                                | 2.5                             | 0.27                 | 4.68  | 4.59   |
| M4               | 1 878 000                                | 2.5                             | 0.29                 | 4.92  | 4.79   |

Как видно из таблицы, прирост энергии соответствует увеличению капиталовложений в модернизацию. Для того, чтобы определить наиболее эффективное решение для условий Республики Куба были построены графики зависимостей стоимости модернизации и величины энергии, вырабатываемой при учете 2 климатических факторов (см. рисунок 4.5). Данные зависимости необходимы для определения величины вырабатываемой энергии в условиях

ограниченных денежных средств. Такой подход является характерным в странах с развивающейся экономикой и ограниченными ресурсами.

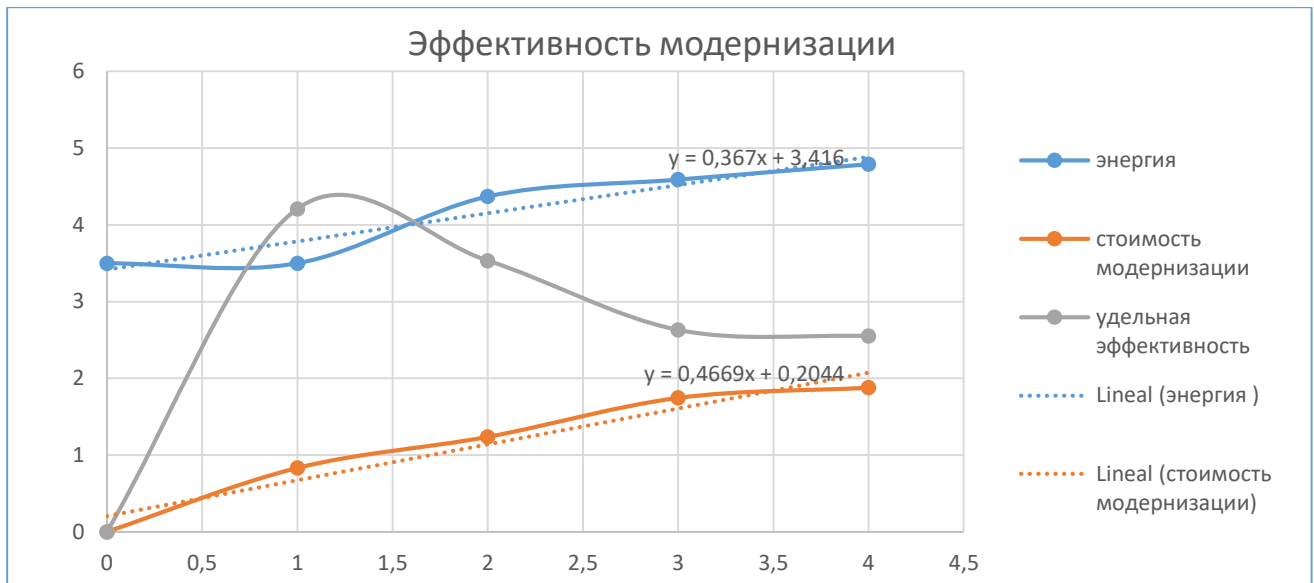


Рисунок 4.5 – Эффективность модернизации (Ось X – это степень модернизации, ось Y – энергия и затраты)

Анализ результатов показывает, что наиболее эффективным решением с точки зрения экономических затрат и прироста энергии, генерируемой солнечной электростанцией, является 2 сценарий и второй тип модернизации. Так как в этом случае модернизации, прирост энергии составляет наиболее значение и превышает средний прирост энергии. Однако, это не является самым эффективным с точки зрения экономических затрат вариантом модернизации. Четвертый и пятый тип модернизации показывают одинаковую динамику увеличения, которые также являются эффективными, в то время как первый тип модернизации является неэффективным решением, так как прирост энергии ниже среднего, в то время как затраты на модернизацию выше среднего.

Согласно полученным зависимостям, следует вывод, что для Республики Куба характерна линейная зависимость прироста энергии и увеличения затрат на модернизацию. Согласно полученным зависимостям, представляется возможным осуществлять прогнозирование вырабатываемой энергии при различных капитальных затратах. Такой подход является актуальным для стран с развивающейся экономикой и ограниченным бюджетом.

### 4.3 Алгоритм выбора типа модернизации

На основании полученных результатов, был разработан алгоритм выбора типа модернизации, в основу которого может быть заложено решение двух задач – нахождение наиболее эффективного решения с точки зрения эффективности вложения единицы денег или нахождение наиболее эффективного решения, обеспечивающего при ограниченных инвестициях максимальный прирост мощности.

Для условий Республики Куба, которая является страной с развивающейся экономикой, второй вариант является наилучшим, так выполняется стратегическая задача увеличения мощностей, поставляемых в национальную электрическую сеть.

На рисунке 4.6 представлена блок схема алгоритма.

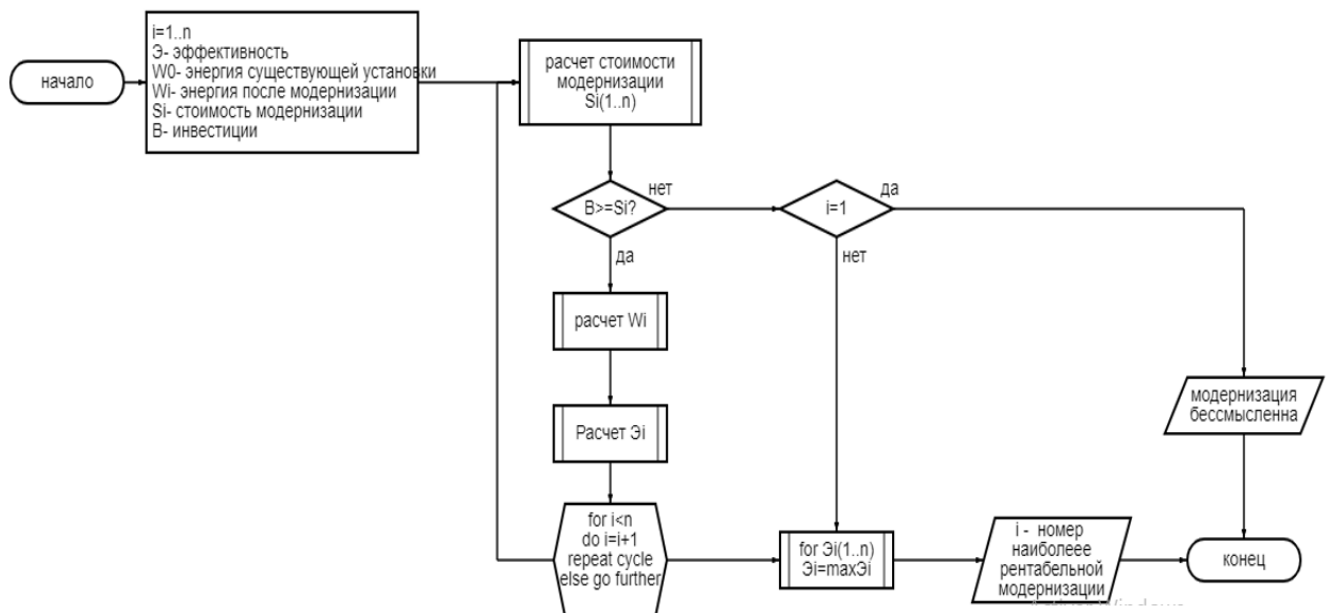


Рисунок 4.6 – Блок схема алгоритма выбора типа модернизации

Работа алгоритма заключается в следующем. Сначала необходимо определить и задать следующие параметры – изначальная мощность существующей установки и годовая вырабатываемая энергия; инвестиции, вкладываемые в модернизацию. Далее на основе комплексного анализа, в который входит анализ климатических характеристик региона, анализ

современных технологий и технических решений, на основании которых осуществляется выбор различных видов модернизации. Затем определяется количество решений модернизации.

Первым расчетом в алгоритме является расчет стоимости каждого способа модернизации (пример расчетов приведен в предыдущем разделе). Расчет происходит до того момента, пока номер итерации не станет равным числу типов модернизации. Стоимость каждой модернизации сравнивается с величиной инвестиций. Исключаются те варианты, стоимость которых превышает размер инвестиций.

Далее осуществляется расчет для каждого типа модернизации прироста энергии, также сравнивается с изначальной энергией существующей электростанции. Затем, на основании полученных в предыдущем разделе зависимостей, выбирается наиболее эффективное решение с точки зрения прироста мощностей и с наименьшими затратами.

#### **4.4 Воздействие на окружающую среду**

На территории Республики Куба солнечные электростанции занимают второе место по внедрению и будущей генерации мощности. Это связано с рядом преимуществ, которыми обладают солнечные электростанции, к которым можно отнести:

1. Решение проблем электроснабжения при отсутствии сетевых источников энергии, независимость от централизованных источников энергоснабжения, коммунальной инфраструктуры
2. Снятие ограничений по выделяемым мощностям.
3. Экономия энергоресурсов.
4. Сохранение территорий и природных ресурсов от прокладки линий электропередачи.
5. Экономическая целесообразность.
6. Экологическая политика и экологическая безопасность.

В настоящее время все солнечные электростанции, работающие в Республике Куба, имеют стационарные солнечные генераторы и импортируют электрические компоненты, такие как инверторы, регуляторы и трансформаторы. Однако солнечные модули собраны по китайской технологии в провинции Пинардель-Рио, в Республике Куба.

Однако существующая сегодня технология слежения за солнцем и позиционирование солнечного модуля на максимально яркий объект на сегодняшний день не используется в системах генерации солнечных электростанций на территории Республики Куба. Этот факт является одним из основных экономических и технических исследований, проводимых в настоящее время в стране для оценки этой технологии с учетом климатических условий региона.

С точки зрения экологической оценки этих солнечных систем, работающих в Республике Куба, можно утверждать, что подобные решения представляют собой экологически чистый альтернативный способ генерации электрической энергии.

Экологическое и экономическое воздействие этих систем выработки электроэнергии может быть оценено с использованием нескольких показателей, одним из которых являются выбросы  $CO_2$ , поскольку на каждый 1 кВтч электроэнергии, вырабатываемой из возобновляемых источников, энергии 1 кВтч больше не вырабатывается энергии из невозобновляемых источников энергии.

В качестве примера вышесказанного можно сказать, что на солнечной электростанции с установленной мощностью 2,5 МВт (Сантьяго - де - Куба), которая в настоящее время производит 3,6 ГВтч энергии в год, она больше не выбрасывается в атмосферу 3.7 кт  $CO_2$  / кВтч.

Используя следующее уравнение 4.12, возможно теоретически рассчитать снижение концентрации углекислого газа в атмосфере, если изменить концепцию производства электроэнергии, используя такие возобновляемые ресурсы, как солнечную и ветровые энергии, энергию биомассы и другие виды энергий.

$$E = (FE * EA) * 10^{-6}, \quad (4.12)$$

где: E– Выбросы  $CO_2$  (кт  $CO_2$  / кВтч), FE– Коэффициент выбросов (г  $CO_2$  / кВтч ), EA– Электричество сохранено (кВт/ год).

В недавних исследованиях, проведенных в Республике Куба в конкретных климатических условиях региона, было определено, что более эффективные технологии могут быть использованы для захвата солнечных лучей (например, системы солнечного слежения). Применение систем слежения за Солнцем позволит увеличить значения генерируемой энергии на 25– 30%. электроэнергии, поставляемой в национальную электрическую сеть. Прирост энергии приведет к снижению выбросов  $CO_2$  на 4.7 кт  $CO_2$  / кВтч (Используя уравнение 4.12 с коэффициентом выбросов 1050 г  $CO_2$ / кВтч).

По данным Центра анализа информации о выбросах диоксида углерода (Отделение наук об окружающей среде национальной лаборатории Oak Ridge (Tennessee, EE. UU.), выбросы  $CO_2$ , произведенные Республикой Куба в период с 1960– 2014гг. в среднем составили 26,5876 кт.



Рисунок 4.7 – Выбросы  $CO_2$ , выбрасываемые в атмосферу Республикой Куба (1960– 2014)

На рисунке 4.7 показана поведение углекислого газа в атмосфере, который выбрасывался в период с 1960 по 2014 год, где очевидно, что сокращение  $CO_2$  с 1991 по 2008 год в основном связано с экономическим кризисом, с которым

столкнулась Республика Куба в то время. После этого критического периода эмиссия  $CO_2$  достигла своего максимального значения в 38 375 кт. После 2010 года выбросы углекислого газа в атмосферу начали снижаться, из-за увеличения использования возобновляемых источников энергии в стране для производства электроэнергии.

Согласно исследованиям, проведенным Министерством энергетики и горнодобывающей промышленности (МИНВАС) Республики Куба в 2018 году, средний коэффициент выбросов  $CO_2$ , получаемых при производстве электроэнергии из невозобновляемых источников энергии составил 1050 г / кВтч. Предполагается, что к 2030 году этот коэффициент выбросов будет снижен до 993 г / кВтч.

Согласно исследованию, можно сделать вывод, что политика, применяемая Республикой Куба, является успешной, поскольку энергетическая матрица страны разрабатывается с целью повышения ее эффективности и уменьшения загрязнения окружающей среды за счет применения возобновляемых источников энергии для выработки электроэнергии. Кроме того, отмечается, что тенденция эмиссии  $CO_2$  с 2010 года является ниспадающей, что является благоприятной для достижения чистой окружающей среды.

С другой стороны, можно утверждать, что использование солнечных систем слежения может еще больше снизить выбросы  $CO_2$  в атмосферу, что является положительным аспектом для этого типа технологий.

#### **4.5 Выводы по четвертой главе**

- Как строительство новых промышленных производств, так и повышение эффективности генерирующих мощностей оказывают важное влияние на социально-экономическое развитие региона. Поскольку эти улучшения обеспечивают более высокое качество жизни и лучшее предоставление основных услуг гражданам, проживающим в этом регионе, что способствует созданию новых рабочих мест и тем самым снижает уровень безработицы.

- Также улучшается экологическая часть, поскольку за счет повышения эффективности электростанций показатели загрязнения окружающей среды снижаются, в этом случае они представляют собой выбросы  $CO_2$ , которые не только влияют на экосистему, но и вызывают респираторные заболевания у жителей, которые живут рядом с этими объектами.
- По результатам представленных в четвертой главе исследований, можно сделать следующие выводы:
  1. Установлено, что для выполнения экономической оценки способа модернизации электротехнического комплекса в условиях республики Куба, следует использовать получение эффективного соотношения экономического результата и затрат под влиянием этого результата;
  2. Разработанный алгоритм выбора типа модернизации в условиях учета социально– экономического фактора позволяет при наличии ограничений в инвестициях, получить максимальный пророст генерирования электроэнергии в электротехническом комплексе, содержащем солнечную электростанцию.
  3. Приведенная оценка экономического аспекта применения солнечных подстанций подтверждает целесообразность их использования с точки зрения социальной безопасности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи по повышению энергоэффективности работы электротехнического комплекса с применением солнечных батарей в условиях вариативности климатических факторов.

1. Проведенный анализ существующих подходов к формированию структуры электротехнического комплекса, содержащего солнечную электростанцию, позволил определить основные направления технического решения, в котором определяющую роль играет тип солнечных батарей и возможность реализации системы слежения.

2. Выявлена совокупность климатических факторов, вклад которых необходимо было оценить для условий провинции Сантьяго-де-Куба. В совокупность входят: солнечное излучение ( $G_h$ ); температура окружающей среды ( $T_a$ ); атмосферное давление ( $P_a$ ); относительная влажность ( $H_r$ ) и скорость ветра.

3. Проведенный факторный анализ по критерию коэффициента детерминации показал, что для выбранных климатических условий достаточно учитывать два фактора: солнечное излучение и температуру окружающей среды, при этом коэффициент детерминации принимает максимальное значение и равен 0,86.

4. Разработанная математическая и компьютерная модель солнечной электростанции позволяет двумя разными способами оценить величину генерируемой энергии в конкретных климатических условиях и для конкретной структуры системы подстанции, что легло в основу формирования экономической модели системы.

5. Данные исследований по горизонтальной радиации показывают, что солнечная радиация, улавливаемая солнечной панелью, может быть увеличена путем внедрения более передовых технологий, таких как системы отслеживания

наиболее яркого объекта, поскольку это увеличит количество вырабатываемой электроэнергии на 30%.

6. Разработан алгоритм выбора наиболее рационального варианта модернизации (или проектирования) солнечной электроподстанции, в основу которого положена сформированная функция, отражающая максимально возможное значение генерации электроэнергии в зависимости от ограничений по климатическим, возможным техническим и социально– экономическим факторам.

7. Создана лабораторная модель, позволяющая оценить в реальных условиях адекватность разработанных математических и компьютерных моделей по генерации электроэнергии на солнечных электростанциях.

8. Полученные в диссертационной работе результаты планируется внедрить на действующей солнечной электроподстанции в провинции Сантьяго-де-Куба, в Республике Куба.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. А да Роза, Возобновляемые источники энергии. Физико– технические основы, перевод с английского под редакцией С.П. Малышенко, О.С. Попеля, М., МЭИ, 2010 – 704с.
2. Абрамович, Б.Н. Система бесперебойного электроснабжения предприятий горной промышленности / Б.Н. Абрамович. // Записки горного института. – 2018. – Т. 229 – С. 31– 41. DOI: 10.25515/pmi.2018.1.31.
3. Абрамович, Б.Н. Яковлева, Э.В. Солнечная электростанция в системе энергоснабжения геологоразведочных работ // Энерго – и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: сборник материалов Всероссийской студенческой олимпиады, научно– практической конференции и выставки работ студентов, аспирантов и молодых ученых, Екатеринбург, 2010, С. 427– 428.
4. Абрамович, Б.Н. Яковлева, Э.В. Фотоэлектрическая станция прямого преобразования для объектов минерально– сырьевого комплекса // Записки Горного института: РИЦ СПГИ (ТУ). – Т. 196 – 2012. – С. 210– 213.
5. Абрамович, Б.Н. Яковлева, Э.В. Анализ применения фотоэлектрических станций на объектах горнодобывающей промышленности на территории России (тезисы), ХLI Неделя науки СПбГПУ, 2012, С. 114– 116.
6. Алхасов, А.Б. Возобновляемая энергетика. – М.: Физмалит. 2010. С.133
7. Ахмедов, М.Р. Методика проектирования орбитальных и транспортных модулей с солнечными батареями большой мощности: диссертация... кандидата технических наук: 05.07.02 / Ахмедов Муслим Ринатович: ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»]. – Королев, 2019. – 186 с.
8. Виссарионов, В.И. Дерюгина, Г.В. Кузнецова, В.А. Бояркин, В.В. Малинин Н.К. методическое пособие по курсовому и дипломному проектированию по специальностям «Нетрадиционные и возобновляемые источники

- энергии» и «Гидроэнергетика». Техничко– экономические характеристики солнечной энергетики на основе фотоэлектрических энергоустановок (справочные материалы), М., МЭИ, 1996 – 52с.
9. Воздвиженский, Б.И. Волков, С.А. Волков, А.С. Колонковое бурение, М., Недра, 1982 – 359с.
  10. Вяхирев, Ю.Р. Потенциал нетрадиционных источников энергии: Монография. – СПб.:СПГГИ(ТУ), 2003 – 136 с.
  11. Бельский, А.А. Эксплуатация однофазного автономного инвертора в составе ветроэнергетического комплекса малой мощности / А.А. Бельский, В.С. Добуш, Ш.Ф. Хайкал // Записки Горного института. – 2019. – Том 239. – С. 564– 569. DOI: 10.31897/pmi.2019.5.564
  12. Виссарионов, В.И. Дерюгина, Г.В. Кузнецова, В.А. Бояркин, В.В. Малинин, Н.К. Методическое пособие по курсовому и дипломному проектированию по специальностям «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» и «Гидроэнергетика». Техничко– экономические характеристики солнечной энергетики на основе фотоэлектрических энергоустановок (справочные материалы), М., МЭИ, 1996 – 52с.
  13. Драбкин, Л. М. Солнечные электростанции // Соровский образов. Журнал, № 4, 1999, С. 105– 109.
  14. Ефимов, А.С. Отчет о работе Батамайской солнечной электростанции установленной мощностью 30 кВт за период 26.07.2012–05.11.2012 г., Открытое Акционерное Общество «Сахаэнерго» Отдел альтернативных источников энергии и новых технологий, Якутск, 2012 – 20с.
  15. Захидов, Р.А. Комбинированная солнечно– ветровая установка для автономного энергоснабжения удаленных объектов // Горный журнал, специальный выпуск, 2004, С. 108– 109.
  16. Зуев, В.Е. Прозрачность атмосферы для видимых и инфракрасных лучей, М., 1966 – 317с.
  17. Кашкаров, А. Ветрогенераторы, солнечные батареи и другие полезные конструкции, ДМК Пресс, 2011 – 144с.

18. Кобышева, Н.В., Технические системы. Глава 12, С. 479– 503.
19. Кононович, Э.В. Мороз В.И., Общий курс астрономии: учебное пособие/ под редакцией В.В. Иванова, Изд. 2– е, испр., М., Едиториал УРСС, 2004 – 544с.
20. Герра, Д.Д. Экспериментальная модель автономной солнечной электростанции с системой слежения за солнцем / Д.Д. Герра, Э.В. Яковлева. – Текст: непосредственный // В сборнике: Энергетика и энергосбережение: теория и практика. Сборник материалов IV Всероссийской научно– практической конференции: электронный сборник. Под редакцией В.Г. Каширских, И.А. Лобур. – 2018. – С. 215.1– 215.4.
21. 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.
22. Герра, Д.Д. Математическое моделирование электротехнического комплекса с фотоэлектрическими модулями в климатических условиях Республики Куба / Д.Д. Герра, Я.Э. Шклярский, Э.В. Яковлева – Текст: непосредственный // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2020. – № 5. – С. 422– 431.
23. Герра, Д.Д. Оценка статистическими методами генерации электрической энергии электротехническим комплексом с фотоэлектрическими панелями / Д.Д. Герра – Текст: непосредственный // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2020. – № 12. – С. 369– 378.
24. Герра, Д.Д. Математическое моделирование солнечной электростанции в климатических условиях Республики Куба / Д.Д. Герра, Э.В. Яковлева – Текст: непосредственный // Вопросы электротехнологии. – 2020. – № 1(26). – С. 52– 60.
25. Паносян, Ж.Р. Енгибарян, Е.В. Восканян, С.С. Новый фотоэлектрический преобразователь солнечной энергии // Горный журнал, специальный выпуск, 2004, С. 114– 116.

26. Паносян, Ж.Р. Солнечная электростанция с водородной системой аккумулирования // Горный журнал, специальный выпуск, 2004, С. 111–112.
27. Попель, О.С. Возобновляемые источники энергии: роль и место в современной и перспективной энергетике, Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об– ва им. Д.И. Менделеева), 2008, т. LII, № 6, С. 95– 106.
28. Паньков, И.А. Повышение качества электроэнергии в автономных электроэнергетических системах / И.А. Паньков, В.Я. Фролов // Записки Горного института. – 2017. – Том 227. – С. 563– 568. DOI: 10.25515/pti.2017.5.563.
29. Свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ 2020615141. Российская Федерация. Программа для исследования режимов работы солнечных батарей / Д.Д. Герра, Э.В. Яковлева; правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт– Петербургский горный университет». – № 2020613791; заявл. 03.04.20; зарегистр. 18.05.2020; опубл. 18.05.2020 – 1 с.
30. Сборник сметных норм на геологоразведочные работы, Вып. 5. Разведочное бурение. (ВНИИ экономики минерального сырья и недропользования (ВИЭМС). – М.: ВИЭМС, 1993. – 258с.
31. Таганова, А.А. Бубнов, Ю.И. Орлов, С.Б. Элементы и аккумуляторы: оборудование для испытаний и эксплуатации, СПб., 2005
32. Тарнижевский, Б.В. Шмидт, И.А. Додонов, Л.Д. Мальцева, А.В. Макарова, Е.С. Методика и результаты расчета выработки энергии солнечными фотоэлектрическими установками// «Известия Академии Наук» №6, 2001., 158с.
33. Тарнижевский, Б.В. Перспективы использования возобновляемых источников энергии в России // Горный журнал, специальный выпуск, 2004, С. 22– 25.

34. Телешов, В.Г. Организация использования нетрадиционных источников энергии, учебное пособие, Чита 2004, 90с.
35. Титаренко, В.П. [Электронный ресурс]: учебное пособие, Томский государственный университет, Томск 2006 дата обращения 14.03.2013
36. Указ Президента РФ №899 от 7.07.2011 «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации
37. Ali, M.I.M. Efficiency of solar cells for UAV / Ali M.I.M., Husni M.H. // 2019 International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering 8(5s), pp. 575– 577
38. AMIR ABAS, M. Improved Structure of Solar Tracker with Microcontroller Based Control / AMIR ABAS, M. et all // Proceeding in the 2010 Second International Conference on Advances in Computing, Control and Telecommunication Technologies (ACT). – 2010. – p. 55– 59, doi: dx.doi.org/10.1109/ACT.2010.28, E– ISBN: 978– 0– 7695– 4269– 0.
39. Andreas, W.B. Dimroth, F. Guter, W. Hoheisel, R. Oliva, E. Philipps, S. Schöne, J. Siefer, G. Steiner, M. Wekkeli, A. Welser, Elke. Meusel\*, Matthias. Köstler\*, W. Strobl, G. // Highest efficiency multi– junction solar cell for terrestrial and space applications // Fraunhofer ISE, Heidenhofstrasse 2, 79110 Freiburg, Germany.
40. Atmospheric Science Data Center [электронный ресурс]:NASA Surface meteorology and Solar Energy: Data Subset, URL: <http://eosweb.larc.nasa.gov/cgiin/sse/subset.cgi?email=em88mi@gmail.com>
41. Augmented reality system and maintenance of oil pumps / Koteleva N., Buslaev G., Valnev V., Kunshin A. // International Journal of Engineering, Transactions B: Applications. 2020. 33 (8). pp. 1620– 1628. DOI: 10.5829/ije.2020.33.08b.20
42. Alvarez, M. Determination of the Grid CO<sub>2</sub> Emission Factor for the Electrical System of the Dominican Republic // Alvarez, M., Cuello N., Berigüete R. // Proceeding of the ixth International Symposium on Energy & Technology

- Innovation Forum, Puerto Rico Energy Center– Laccei, February 20– 21, 2014. – 2014. – Puerto Rico. – pp. 1– 10.
43. Alves, P. Fernandes, J. F. P. Torres, J. P. N. Costa Branco, P. J. Fernandes, C. Gomes, J. (2019). From sweden to portugal: The effect of very distinct climate zones on energy efficiency of a concentrating photovoltaic/thermal system (CPV/T). *Solar Energy*, 188, 96– 110. doi:10.1016/j.solener.2019.05.038
  44. 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), 149– 179. doi:10.1002/wics.1246
  45. Ait– Sahalia, Y. Xiu, D. (2019). Principal component analysis of high– frequency data. *Journal of the American Statistical Association*, 114(525), 287– 303. doi:10.1080/01621459.2017.1401542
  46. Barbaro, P.V. A novel approach based on nonactive power for the identification of disturbing loads in power systems / P.V. Barbaro, A. Cataliotti, V. Cosentino, S. Nuccio // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 2007. – vol. 22, July. – P. 1782– 178/
  47. Baranes, E. Jacqmin, J. Poudou, J. – . (2017). Non– renewable and intermittent renewable energy sources: Friends and foes? *Energy Policy*, 111, 58– 67. doi:10.1016/j.enpol.2017.09.018
  48. Boikov, A. V. Savelev, R. V. Payor, V. A. Potapov, A. V. Evaluation of bulk material behavior control method in technological units using DEM. Part 2. *CIS Iron and Steel Review*, vol. 20, 2020, pp. 10– 13. DOI: 10.17580/cisisr.2020.02.01
  49. Brown, M.H. Fridley, D. El Uso Eficiente de la Energía. La eficiencia en energética: algo que es más fácil decir que hacer // *E– journal USA*, 2009, vol.14, n.4, p.4– 8, USA: Departamento de Estado de USA, Oficina de Programa de Información Internacional
  50. Belsky, A.A. The use of hybrid energy storage devices for balancing the electricity load profile of enterprises / Belsky A.A., Skamyin, A.N., Vasilkov,

- O.S. // Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations. 2020. 63(3). pp. 212–222 DOI: 10.21122/1029–7448–2020–63–3–212–222
51. Belsky, A.A. Skamyin, A.N. Iakovleva, E.V. Configuration of a standalone hybrid wind–diesel photoelectric unit for guaranteed power supply for mineral resource industry facilities. *International Journal of Applied Engineering Research* – 2016. – Vol. 11 (1). – Pp. 233–238.
  52. 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
  53. Chiou, J. Chen, Y. Yang, Y. (2014). Multivariate functional principal component analysis: A normalization approach. *Statistica Sinica*, 24(4), 1571–1596. doi:10.5705/ss.2013.305
  54. Refaat, A. Shehata, A.A. Elgamal, M. Korovkin, N.V. Current collector optimizer topology with reconfiguration algorithm to harvest optimal power from nonuniform aged PV arrays / Refaat, A., Shehata, A.A., Elgamal, M., Korovkin, N.V. // 2020 International Multi–Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020, 2020, 9271455. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271455
  55. Dobush, V.S. Electrical Complex for Autonomous Power Supply of Oil Leakage Detection Systems in Pipelines / Dobush, V.S. Belsky, A.A. Skamyin, A.N. // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. 1441(1). 012021
  56. Donat, L., Velten, E.K. Prah, A. Duwe, M. Zane, E.B. (2014) Assessment of climate change policies in the context of the European Semester, Ecologic Institute – eclareon, 2014, pp. 1–18
  57. Dobush, V.S. Electrical Complex for Autonomous Power Supply of Oil Leakage Detection Systems in Pipelines / Dobush, V.S., Belsky, A.A., Skamyin, A.N. // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. 1441(1). 012021

58. 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 , pp. 20– 25.
59. Eder, L. V. Provornaya, I. V. Filimonova, I. V. Kozhevin, V. D. Komarova, A. V. (2018). World energy market in the conditions of low oil prices, the role of renewable energy sources. Paper presented at the Energy Procedia, 153 112–117. doi:10.1016/j.egypro.2018.10.068
60. Evaluacion de distintos metodos para estimar la temperature de operacion de modulos fotovoltaicos y estimacion de las perdidas de energia por efecto de la temperature / Mario Battioni, Gustavo Risso, Miriam Cutrera, Javier Schmidt // IFIS Litoral – CONICET– UNL. Güemes 3450, 3000 Santa Fegusrisso@fiq.unl.edu.ar
61. Digital platform as a means of process optimization of integrating electric vehicles into electric power networks / Zhukovskiy Y.L., Suslikov P.K., Arapova E.G., Alieva L.Z. // Journal of Physics: Conference Series. 2020. 1661(1). 012162. DOI: 10.1088/1742– 6596/1661/1/012162
62. Economic effect of dust particles on photovoltaic plant production / Alonso–Montesinos, J., Martínez, F.R., Polo, J., Martín– Chivelet, N., Batlles, F.J. // Energies 2020, 13(23), 6376
63. Enriquez, J.M. et al. A reliable, fast and low cost maximun power point tracker for photovoltaic applications // Solar Energy. 2010. V84 (1). p. 79– 89
64. Escobar Mela, et al. Diseño e Implementación de un Seguidor Solar para la optimización de un sistema fotovoltaico // Scientia et Technica. 2010. V1 (44) pp. 245– 250.
65. Environmental Science. 2017. 87(3). 032056. DOI: 10.1088/1755– 1315/87/3/032056
66. Enriquez, J.M. et al. A reliable, fast and low cost maximun power point tracker for photovoltaic applications // Solar Energy, 2010, vol.84, n.1, p. 79– 89.

67. Evaluation of bulk material behavior control method in technological units using DEM. Part 2 / Boikov A. V., Savelev R. V., Payor V. A., Potapov A. V. // CIS Iron and Steel Review. 2020. V. 20. pp. 10– 13. DOI: 10.17580/cisisr.2020.02.01
68. Fuente: Carbon Dioxide Information Analysis Centre (CDIAC), viewed 15 January 2020, <https://elordenmundial.com/mapas/paises-emisiones-co2-1751-2016/>
69. Fundamentos de Energía Solar Térmica, Emiliano Sierra, CI 4230513– 5, nov. 2010.
70. Furlan, C. Mortarino, C. (2018). Forecasting the impact of renewable energies in competition with non-renewable sources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1879– 1886. doi:10.1016/j.rser.2017.05.284
71. Fakouriyan, S. Saboohi, Y. Fathi, A. (2019). Experimental analysis of a cooling system effect on photovoltaic panels' efficiency and its preheating water production. *Renewable Energy*, , 1362– 1368. doi:10.1016/j.renene.2018.09.054
72. Fan, J. Liao, Y. Wang, W. (2016). Projected principal component analysis in factor models. *Annals of Statistics*, 44(1), 219– 254. doi:10.1214/15-AOS1364
73. Gerra, D.D. Iakovleva, E.V. Sun tracking system for photovoltaic batteries in climatic conditions of the Republic of Cuba. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – № 643. – Pp. 1 – 7. DOI 10.1088/1757-899X/643/1/012155
74. Guerra, D.D. Iakovleva, E.V. Mathematical modeling of parameters of solar modules for a solar power plant 2.5 MW in the climatic conditions of the Republic of Cuba. *E3S Web of Conferences. Proceedings of the International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE– 2019)*. – 2020. – Vol. 140. – Pp. 1– 6. DOI: 10.1051/e3sconf/201914004013.
75. Guerra, D.D. Iakovleva, E.V. Shklyarsky, A.Y. Alternative Measures to Reduce Carbon Dioxide Emissions in the Republic of Cuba. *Journal of Ecological Engineering*. – 2020. 21 (4), Pp. 55– 60. DOI 10.12911/22998993/119800

76. Guerra, D.D. Iakovleva, E.V. Improving the efficiency of the use of photovoltaic stations in the republic of Cuba. *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. 1753. Paper number 012056. DOI: 10.1088/1742– 6596/1753/1/012056
77. Glazev, M. Environmental technologies in the production of metallurgical silicon / Glazev M., Bazhin V. // *Scientific and Practical Studies of Raw Material Issues– Proceedings of the Russian– German Raw Materials Dialogue: A Collection of Young Scientists Papers and Discussion*, 2019, 2020, сtp. 114–119; DOI: 10.1201/9781003017226– 17
78. Gulkov, Y. V. Research of grounding systems of electrical complexes in the conditions of permafrost soils / Gulkov Y. V., Turysheva A. V., Kopteva A.V. // *Proceedings of the 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019*. 2019. 1. pp. 969– 972. DOI: 10.1109/EIConRus.2019.8657119
79. Gutiérrez, J.C. Prototype of photovoltaic system with low cost solar tracking. University of Panamericana campus Aguascalientes, year 2016
80. 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), 649– 659. doi:10.1080/01621459.2016.1273115.
81. 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. pp. 43– 54. DOI: 10.1016/j.renene.2020.07.132
82. Iqbal, M. *An introduction to Solar Radiation*. Academic Press 1983. 408 P
83. 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. pp. 43– 54. DOI: 10.1016/j.renene.2020.07.132
84. 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

85. 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
86. 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). PP. 17–24
87. Johann, A.H. Metodología para el análisis técnico de la masificación de sistemas fotovoltaicos como opción de generación distribuida en redes de baja tension. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia 2012
88. Carbonell, M. Solar tracker operation and origins. URL: <https://www.hogarsense.es/energia-solar/seguidor-solar> (дата обращения 18.01.2021)
89. Ma, Z. (2013). Sparse principal component analysis and iterative thresholding. *Annals of Statistics*, 41(2), 772– 801. doi:10.1214/13-AOS1097
90. Pedraza, J.M. (2018). Focus on Renewable Energy Source, pp. 1– 59.
91. Pudkova, T.V. Bardanov, A.I. Principles of electricity metering in networks with non– liner load. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 140. 07003. DOI: 10.1051/e3sconf/201914007003/
92. Ngo Ngoc, T. Phung, Q. N. Tung, L. N. Riva Sanseverino, Romano P. Viola, F. (2017). Increasing efficiency of photovoltaic systems under non– homogeneous solar irradiation using improved dynamic programming methods. *Solar Energy*, 150, 325– 334. doi:10.1016/j.solener.2017.04.057
93. Peng, Z. Herfatmanesh, M. Liu, Y. (2017). Cooled solar PV panels for output energy efficiency optimisation. *Energy Conversion and Management*, 150, 949– 955. doi:10.1016/j.enconman.2017.07.007
94. Roca, J. A. Theworld's 10 largest manufacturers of photovoltaic followers in 2018: three Spanish, PVH, Soltec and STi, in the Top 10. *Global PV tracker supplier market rankings*, March 2019, p 1

95. Research project by Massimo Banzi, David Cuartielles, Tom Igoe, Gianluca Martino, and David Mellis at the Interaction Design Institute of Ivrea in the early 2000s
96. Rezk, H. Hasaneen, E. S. (2015). A new MATLAB/Simulink model of triple-junction solar cell and MPPT based on artificial neural networks for photovoltaic energy systems. *Ain Shams Engineering Journal*, 6(3), 873–881. doi: <http://doi.org/10.1016/j.asej.2015.03.001>.
97. Ragazzi, M. Ionescu, Cioranu, S. I. (2017). Assessment of environmental impact from renewable and non-renewable energy sources. *International Journal of Energy Production and Management*, 2(1), 8–16. doi:10.2495/EQ-V2-N1-8-16
98. Rassõlkin, Anton. Belahcen, Anouar. Kallaste, A. Vaimann, T. Lukichev, D. Orlova, S. Heidari, H. Asad, B. Acedo, J. Life cycle analysis of electrical motor-drive system based on electrical machine type, *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, 69, 2, pp. 162–177, 2020, Estonian Academy Publishers
99. Sierra, E. *Solarimetría // Fundamentos de Energia Solar Termica*, CI 4230513–5 Nov. 2010
100. Yu, J. (2012). Local and global principal component analysis for process monitoring. *Journal of Process Control*, 22(7), 1358–1373. doi:10.1016/j.jprocont.2012.06.008
101. Lu, C. Feng, Y. Fei, C. (2019). Weighted regression-based extremum response surface method for structural dynamic fuzzy reliability analysis. *Energies*, 12(9) doi:10.3390/en12091588]
102. Lavrenko, S.A. Energy efficient unit executive body for tunneling and cleaning operations / Lavrenko S.A., Shishljannikov D.I., Maksimov A.B. // *Innovation-Based Development of the Mineral Resources Sector: Challenges and Prospects – 11th conference of the Russian– German Raw Materials 2018*. 2019. pp. 287–292.

103. Lavrik, A. Assessing the solar power plant efficiency degradation resulting from heating / Lavrik A., Iakovleva E., Leskov A. // *Journal of Ecological Engineering* 2018. 19(3). pp. 115– 119. DOI: 10.12911/22998993/86149
104. Litvinenko V. S. The role of hydrocarbons in the global energy agenda: the focus on liquefied natural gas *Resources 2020* // *Resources 2020*. 9(5). 59. DOI: 10.3390/RESOURCES9050059
105. Lakatos, L. Hevessy, G. Kovács, J. (2011). Advantages and disadvantages of solar energy and wind– power utilization. *World Futures: Journal of General Evolution*, 67(6), 395– 408. doi:10.1080/02604020903021776
106. Liu, H. Lin, C. Pai, K. Lin, Y. (2018). A novel photovoltaic system control strategies for improving hill climbing algorithm efficiencies in consideration of radian and load effect. *Energy Conversion and Management*, 165, 815– 826. doi:10.1016/j.enconman.2018.03.081
107. Kelly, N.A. Improved photovoltaic energy output for cloudy conditions with a solar tracking system / Kelly N.A., Gibson T.L. // *Solar Energy*. 2009. V83. n.11. pp. 2092– 2102. DOI: 10.1016/j.solener.2009.08.009
108. Kelly, N.A. Gibson, T.L. Improved photovoltaic energy output for cloudy conditions with a solar tracking system // *Solar Energy*, 2009, vol.83, n.11, p. 2092– 2102
109. Kelly, N.A. Gibson, T.L. Improved photovoltaic energy output for cloudy conditions with a solar tracking system. *Solar Energy*, 2009, vol.83, n.11, p. 2092– 2102
110. Koteleva, N. Buslaev, G. Valnev, V. Kunshin, A. Augmented reality system and maintenance of oil pumps (2020) *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*, 33 (8), pp. 1620– 1628. DOI: 10.5829/ije.2020.33.08b.20
111. Koziół, J. Mendecka, B. (2015). Evaluation of economic, energy– environmental and sociological effects of substituting non– renewable energy with renewable energy sources. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 3(4), 333– 343. doi:10.13044/j.sdewes.2015.03.0025

112. The power of renewables: Opportunities and challenges for china and the united states. (2011). The power of renewables: Opportunities and challenges for china and the united states (pp. 1– 240) doi:10.17226/12987
113. Sofi, A. Muscolino, G. Giunta, F. (2020). Propagation of uncertain structural properties described by imprecise probability density functions via response surface method. Probabilistic Engineering Mechanics, 60 doi:10.1016/j.probengmech.2020.103020
114. Smirnov, A.I. Voytyuk, I.N. Diagnostics of inter– turn short– circuit in the stator winding of the induction motor // Proceeding of the International Scientific Electric Power Conference 2019, ISEPC 2019, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. 643.1, 13. 012023 doi: 10.1088/1757– 899X/643/1/012023
115. SICODI, a system proposal for management of information from meetings and its use en the cubapetroleo union [Una propuesta de sistema para la gestión de información de reuniones y su empleo en la unión cubapetróleo] / Rosabal, S.B., Castillo, A.M., Santiesteban, L.A.Q., Martínez, Y.F. // ACIMED 2011. 22(4). pp. 362– 370
116. Sychev, Y. A. The Method of Power Factor Calculation under Non– Sinusoidal Conditions / Sychev Y. A., Abramovich B. N., Aladin M. E. // Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Re– searchers in Electrical and Electronic Engineering, EIconRus 2020. 2020. №1. pp. 904– 908. DOI: 10.1109/EIconRus49466.2020.9039427
117. Shklyarskiy, J.E. Bardanov, A.I. Novel Approach to Active Rectifier Control during Voltage Dips // 2018 Int. Multi– Conference Ind. Eng. Mod. Technol. FarEastCon 2018. 2019. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602678
118. Setiawan, E. A. Setiawan, A. Siregar, D. (2017). Analysis on solar panel performance and PV– inverter configuration for tropical region. Journal of Thermal Engineering, 3 (3), 1259–1270. doi:http://doi.org/10.18186/journal– of– thermal– engineering.323392.
119. Solar Buzz [Электронный ресурс]: Data, URL: //http://solarbuzz.com/

120. Solar home [Электронный ресурс]: Data, URL: <http://www.solarhome.ru/basics/pv/techirrad.htm?print=1>
121. Solar Lab, SL.305– 1, Лабораторный стенд, руководство пользователя. Bio Art, 2012.
122. Silvestre, S. Castanar, L. Guasch, D. (2008). Herramientas de Simulacion para Sistemas Fotovoltaicos en Ingenieria. Formacion Universitaria, 1 (1), 13–18. doi: <http://doi.org/10.4067/S0718–50062008000100003>.
123. Shehata, A.A. Optimal Allocation of FACTS Devices based on Multi– Objective Multi– Verse Optimizer Algorithm for Multi– Objective Power System Optimization Problems / Shehata, A.A., Refaat, A., Korovkin, N.V. // 2020 International Multi– Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020, 2020, 9271359. DOI: 10.1109/FarEastCon50210.2020.9271359
124. Six Decades of Carbon Dioxide Concentration in the Atmosphere, National Oceanic & Atmospheric Adm. (NOAA), viewed 5 January 2020, <https://www.noaa.gov/news/global–carbon–dioxide–growth–in–2018–reached–4th–highest–on–record>
125. Two– Axis Sun Tracking System for a Solar Furnace, Gabriel Villeda (1), Alejandro Castañeda, José T. Vegay Jorge // Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada Querétaro, Querétaro– México.
126. Tian, P.C. Output energy of a photovoltaic module mounted on a single– axis tracking system // Applied energy, 2009, vol.86, n.10, p. 2071– 2078
127. The prediction of the residual life of electromechanical equipment based on the artificial neural network / Zhukovskiy Y.L., Korolev N.A., Babanova I.S., Boikov A.V. // IOP Conference Series: Earth and
128. Tafavogh, M. Design and production of a novel encapsulated nano phase change materials to improve thermal efficiency of a quintuple renewable geothermal/hydro/biomass/solar/wind hybrid system / Tafavogh M., Zahedi A. // Renewable Energy 2021 169, pp. 358– 378; DOI: 10.1016/j.renene.2020.12.118

129. Tcvetkov, P. S. Public Perception of Carbon Capture and Storage: A State-of-the-Art Overview / Tcvetkov P. S., Cherepovitsyn A. E., Fedoseev S. V. // Heliyon. 2019. №5. pp. 1– 28. DOI: 10.1016/j.heliyon.2019.e02845
130. Veligorskyi, O. et al. High-efficiency solar tracker development and effectiveness estimation // Proceeding of the IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), 2014, p. 153– 158. DOI: 10.1109/IEPS.2014.6874169

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Результаты исследования

Таблица А.1 – Среднесуточная горизонтальная радиация в горизонтальной плоскости (кВтч / м<sup>2</sup>) за 10 лет

| Год  | Янв  | Фев  | Мар  | Апр  | Май  | Июн  | Июл  | Авг  | Сен  | Окт  | Ноя  | Дек  | Сред |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 2010 | 3,81 | 4,25 | 5,16 | 5,81 | 5,75 | 5,74 | 5,40 | 5,99 | 4,83 | 4,20 | 4,06 | 3,63 | 4,89 |
| 2011 | 4,04 | 5,01 | 5,70 | 6,31 | 5,58 | 5,44 | 5,48 | 5,88 | 5,46 | 4,23 | 4,54 | 3,83 | 5,12 |
| 2012 | 4,13 | 5,06 | 5,79 | 5,21 | 5,49 | 5,92 | 5,94 | 5,56 | 5,49 | 4,32 | 3,88 | 3,86 | 5,05 |
| 2013 | 4,40 | 5,10 | 5,34 | 6,04 | 5,73 | 5,68 | 5,65 | 6,00 | 5,29 | 4,87 | 4,35 | 4,27 | 5,23 |
| 2014 | 4,18 | 5,17 | 5,72 | 5,76 | 5,56 | 5,30 | 6,28 | 6,00 | 5,25 | 4,68 | 4,17 | 3,85 | 5,16 |
| 2015 | 4,44 | 5,01 | 5,70 | 6,47 | 5,68 | 5,55 | 6,20 | 5,87 | 5,65 | 4,47 | 4,10 | 4,14 | 5,27 |
| 2016 | 4,00 | 4,40 | 5,79 | 5,97 | 5,50 | 5,77 | 5,77 | 5,97 | 5,60 | 4,18 | 4,12 | 4,22 | 5,11 |
| 2017 | 4,55 | 5,29 | 5,20 | 5,49 | 5,70 | 6,12 | 6,06 | 6,17 | 5,28 | 4,35 | 3,81 | 3,78 | 5,15 |
| 2018 | 3,41 | 5,37 | 5,58 | 6,02 | 4,70 | 5,97 | 6,27 | 5,84 | 5,19 | 4,51 | 4,77 | 4,05 | 5,13 |
| 2019 | 4,24 | 5,44 | 5,53 | 5,91 | 5,62 | 6,30 | 6,23 | 6,03 | 5,12 | 4,81 | 4,31 | 3,99 | 5,29 |
| 2020 | 4,34 | 5,17 | 5,67 | 6,55 | 5,41 | 5,90 | 5,85 | 6,48 | 5,46 | 4,44 | 3,71 | 3,74 | 5,29 |
| Сред | 4,56 | 5,47 | 6,14 | 6,52 | 6,07 | 6,31 | 6,45 | 6,54 | 5,77 | 4,89 | 4,54 | 4,11 | 5,15 |

Таблица А.2 – Среднемесячная относительная влажность (%) за 10 лет

| Гр   | Янв   | Фев   | Мар   | Апр   | Май   | Июн   | Июл   | Авг   | Сен   | Окт   | Ноя   | Дек   |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2010 | 70,91 | 68,15 | 64,81 | 68,39 | 69,10 | 71,71 | 72,29 | 71,60 | 75,18 | 82,70 | 74,60 | 72,63 |
| 2011 | 73,11 | 68,23 | 62,08 | 60,53 | 64,89 | 80,26 | 74,76 | 75,16 | 71,83 | 81,94 | 72,65 | 74,73 |
| 2012 | 71,51 | 66,71 | 63,34 | 67,07 | 67,27 | 65,42 | 71,03 | 73,17 | 67,15 | 78,78 | 76,79 | 74,98 |
| 2013 | 71,11 | 67,42 | 62,55 | 64,06 | 66,72 | 71,31 | 72,30 | 73,51 | 73,65 | 72,74 | 74,86 | 70,34 |
| 2014 | 71,69 | 72,39 | 66,17 | 67,29 | 70,27 | 76,76 | 70,74 | 73,89 | 76,16 | 72,93 | 73,33 | 73,40 |
| 2015 | 69,61 | 68,35 | 62,85 | 62,92 | 70,84 | 72,52 | 65,69 | 66,36 | 69,09 | 78,29 | 78,51 | 78,47 |
| 2016 | 74,29 | 69,73 | 64,39 | 64,17 | 69,77 | 67,50 | 66,25 | 67,12 | 69,53 | 78,21 | 71,45 | 70,32 |
| 2017 | 64,98 | 65,22 | 66,03 | 67,38 | 67,66 | 68,37 | 69,80 | 67,57 | 73,61 | 76,25 | 78,37 | 76,44 |
| 2018 | 77,55 | 66,40 | 62,85 | 62,54 | 71,52 | 65,07 | 66,69 | 69,71 | 69,04 | 73,58 | 67,13 | 68,01 |
| 2019 | 67,56 | 67,67 | 64,52 | 63,25 | 68,20 | 66,70 | 66,79 | 66,20 | 74,36 | 77,26 | 73,07 | 73,05 |
| 2020 | 68,98 | 67,18 | 61,65 | 57,54 | 62,96 | 62,07 | 63,14 | 66,36 | 70,11 | 79,76 | 84,58 | 81,11 |
| Сред | 78,13 | 73,96 | 70,34 | 70,08 | 74,92 | 76,04 | 75,30 | 76,62 | 77,79 | 85,01 | 81,82 | 76,44 |

Таблица А.3 – Среднемесячное атмосферное давление (Ра) за 10 лет

| Ра   | Янв    | Фев    | Мар    | Апр    | Май    | Июн    | Июл    | Авг    | Сен    | Окт    | Ноя    | Дек    |
|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2010 | 995,80 | 993,06 | 993,58 | 993,89 | 993,78 | 994,60 | 994,61 | 993,53 | 991,74 | 992,04 | 993,53 | 994,75 |
| 2011 | 995,12 | 996,63 | 995,99 | 994,89 | 993,05 | 993,75 | 994,09 | 992,75 | 992,97 | 991,79 | 993,48 | 995,71 |
| 2012 | 997,52 | 996,35 | 996,21 | 994,18 | 993,69 | 994,33 | 995,29 | 994,01 | 993,98 | 990,41 | 994,34 | 994,98 |
| 2013 | 997,26 | 995,66 | 995,44 | 994,91 | 994,77 | 995,03 | 995,67 | 994,38 | 992,60 | 992,97 | 993,14 | 996,15 |
| 2014 | 996,31 | 995,50 | 995,33 | 994,65 | 995,11 | 995,50 | 996,32 | 994,46 | 993,93 | 992,96 | 994,44 | 995,59 |
| 2015 | 997,00 | 996,00 | 996,94 | 994,79 | 995,66 | 995,96 | 995,94 | 994,01 | 992,71 | 992,35 | 993,69 | 995,42 |
| 2016 | 995,60 | 996,16 | 996,38 | 993,99 | 994,63 | 995,80 | 996,00 | 994,32 | 994,36 | 990,87 | 993,27 | 996,38 |
| 2017 | 996,95 | 995,94 | 996,55 | 994,50 | 994,51 | 994,84 | 995,66 | 994,37 | 991,75 | 992,21 | 991,94 | 996,01 |
| 2018 | 995,82 | 998,65 | 995,21 | 995,04 | 994,80 | 995,62 | 995,77 | 995,70 | 993,04 | 993,15 | 994,08 | 996,70 |
| 2019 | 996,52 | 996,65 | 995,69 | 995,27 | 993,90 | 995,26 | 995,27 | 994,48 | 992,13 | 992,80 | 993,03 | 994,37 |
| 2020 | 996,58 | 996,72 | 997,18 | 994,75 | 994,33 | 994,79 | 994,18 | 993,55 | 992,43 | 992,36 | 993,22 | 995,33 |
| Сред | 1001,5 | 1001,7 | 1001,1 | 999,00 | 997,80 | 998,20 | 998,40 | 997,50 | 996,20 | 995,90 | 997,50 | 999,50 |

Таблица А4 – Среднемесячная температура окружающей среды (°С) за 10 лет

| Та   | Янв   | Фев   | Мар   | Апр   | Май   | Июн   | Июл   | Авг   | Сен   | Окт   | Ноя   | Дек   |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2010 | 23,64 | 24,28 | 25,11 | 25,89 | 27,65 | 28,21 | 28,11 | 28,47 | 27,61 | 26,07 | 24,17 | 21,61 |
| 2011 | 23,74 | 24,24 | 24,69 | 26,75 | 26,63 | 26,65 | 27,54 | 27,88 | 27,97 | 26,29 | 25,31 | 24,18 |
| 2012 | 23,69 | 24,73 | 25,12 | 25,66 | 27,25 | 28,60 | 27,79 | 27,89 | 28,52 | 26,36 | 24,44 | 24,49 |
| 2013 | 24,58 | 24,96 | 24,53 | 27,00 | 27,24 | 27,62 | 27,56 | 27,67 | 27,72 | 27,66 | 26,22 | 25,59 |
| 2014 | 24,96 | 25,11 | 25,79 | 26,93 | 26,77 | 26,85 | 28,08 | 27,88 | 27,14 | 27,15 | 26,07 | 24,50 |
| 2015 | 24,78 | 24,20 | 26,03 | 27,36 | 26,86 | 27,51 | 28,56 | 28,94 | 28,88 | 27,04 | 25,96 | 25,46 |
| 2016 | 24,60 | 24,68 | 26,14 | 26,79 | 27,38 | 28,42 | 28,88 | 28,90 | 28,37 | 26,63 | 25,43 | 26,00 |
| 2017 | 24,33 | 25,25 | 25,09 | 26,24 | 27,07 | 28,20 | 28,47 | 29,06 | 28,29 | 27,17 | 25,94 | 24,88 |
| 2018 | 24,34 | 25,02 | 25,06 | 27,39 | 26,94 | 28,44 | 28,65 | 28,16 | 28,04 | 27,00 | 27,17 | 26,05 |
| 2019 | 25,16 | 25,38 | 26,00 | 27,21 | 27,74 | 28,90 | 28,97 | 29,35 | 28,44 | 27,25 | 26,25 | 25,73 |
| 2020 | 24,98 | 25,81 | 25,80 | 28,56 | 28,93 | 29,51 | 29,61 | 29,39 | 28,64 | 27,05 | 25,06 | 24,03 |
| Сред | 26,88 | 27,08 | 28,02 | 29,40 | 30,05 | 30,62 | 30,94 | 31,17 | 30,49 | 29,48 | 27,94 | 25,78 |

Таблица А.5 – Среднемесячная скорость ветра (%) за 10 лет

| Vv   | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 2010 | 3,78 | 3,58 | 3,58 | 4,02 | 3,81 | 3,41 | 3,35 | 2,67 | 3,50 | 2,93 | 4,44 | 3,74 |
| 2011 | 3,48 | 4,19 | 4,00 | 3,64 | 3,25 | 3,46 | 3,19 | 3,30 | 2,27 | 2,74 | 3,71 | 4,33 |
| 2012 | 4,30 | 3,83 | 4,53 | 3,91 | 3,10 | 3,02 | 3,99 | 3,84 | 2,34 | 3,52 | 3,60 | 3,90 |
| 2013 | 4,30 | 3,56 | 3,82 | 3,69 | 3,29 | 3,39 | 3,66 | 3,45 | 2,59 | 2,41 | 3,43 | 4,29 |
| 2014 | 3,35 | 3,57 | 3,47 | 3,47 | 3,47 | 3,00 | 3,29 | 3,54 | 3,15 | 2,65 | 3,60 | 4,01 |
| 2015 | 3,81 | 3,96 | 4,42 | 3,87 | 3,87 | 3,60 | 3,70 | 3,12 | 2,38 | 2,85 | 3,90 | 3,98 |
| 2016 | 3,22 | 4,14 | 3,73 | 3,29 | 3,15 | 2,91 | 3,92 | 3,77 | 3,02 | 3,20 | 4,58 | 4,45 |
| 2017 | 4,17 | 3,55 | 4,45 | 4,11 | 3,73 | 3,59 | 3,39 | 3,44 | 3,15 | 2,93 | 2,99 | 4,03 |
| 2018 | 4,40 | 5,69 | 3,63 | 2,83 | 3,22 | 2,83 | 3,33 | 3,97 | 3,53 | 3,32 | 3,41 | 3,81 |
| 2019 | 3,51 | 4,01 | 3,33 | 3,31 | 2,72 | 2,71 | 3,09 | 2,40 | 2,53 | 2,63 | 3,16 | 3,55 |
| 2020 | 4,18 | 4,23 | 4,63 | 2,72 | 2,84 | 3,24 | 3,72 | 3,63 | 2,42 | 3,21 | 3,58 | 3,39 |
| Сред | 4,25 | 4,38 | 4,37 | 3,86 | 3,65 | 3,48 | 3,83 | 3,69 | 3,05 | 3,23 | 4,01 | 4,14 |

Таблица А.6 – Технические характеристики солнечной панели

(модели ДСМ-240-С)

|   |               |
|---|---------------|
| Мак. Мощность (Вт)                          | 240           |
| Тип кремния                                 | Моно-кристалл |
| Напряжение на открытых зажимах (В)          | 37            |
| Ток короткого замыкания (А)                 | 8.54          |
| Напряжение при макс. мощности (В)           | 29.8          |
| Ток при макс. мощности (А)                  | 8.19          |
| Кэффициент температура $I_{sc}$ (%)         | +0.065 % / °C |
| Кэффициент температура $V_{oc}$ (%)         | -0.34 % / °C  |
| Последовательное сопротивление ( $\Omega$ ) | 0.3546        |
| Параллельное сопротивление ( $\Omega$ )     | 337.822       |
| Эффективность                               | 16%           |

Таблица А.7 – Технические характеристики инвертор (модуля 17000TL)

| <b>Технические данные постоянного тока</b>                       |                   |
|--|-------------------|
| Максимальная мощность СС (Вт)                                    | 17410             |
| Максимальное входное напряжение (В)                              | 1000              |
| Диапазон напряжения МРР / номинальное входное напряжение (В)     | 400 – 800 / 600   |
| Минимальное входное напряжение / пусковое входное напряжение (В) | 150 / 188         |
| Максимальный входной ток (А)                                     | 33                |
| Максимальный входной ток на string (А)                           | 40                |
| <b>Технические данные переменного тока</b>                       |                   |
| Номинальная мощность (при 230 В, 60 Гц) (Вт)                     | 17000             |
| Номинальное напряжение переменного тока (В)                      | 3/N/PE, 240 / 415 |
| Номинальный диапазон переменного напряжения [В]                  | 160 – 280         |
| Частота / Диапазон [Гц]  | 60 / 55 а 65      |
| Максимальный выходной ток (А)                                    | 24.6              |
| Коэффициент мощности   | 1                 |

Таблица А.8 – Технические характеристики трансформатора.

|  |      |
|--|------|
| Активная мощность (при $F_p = 0,9$ , 60 Гц) (кВт)      | 1.12 |
| Кажущаяся максимальная мощность переменного тока (МВА) | 1.25 |
| Первичное номинальное напряжение СА (кВ)               | 13.8 |
| Вторичное Номинальное напряжение СА (В)                | 415  |
| Частота (Гц)   | 60   |
| Первичный максимальный ток (А)                         | 90.5 |
| Вторичный максимальный ток (А)                         | 3000 |

Таблица А.9 – Типичная отражательная способность различных материалов (авторы Hunn y Calafell, 1977)

| Поверхности                             | $\rho$ |
|---|--------|
| Свежий снег                             | 0.75   |
| Белый песок                             | 0.70   |
| Светлые стены                           | 0.60   |
| Темные стены (кирпич или темная краска) | 0.27   |
| Асфальт                                 | 0.20   |
| Зеленая трава                           | 0.13   |
| Сухая трава                             | 0.26   |
| Сухие листья                            | 0.30   |
| Старый железобетон                      | 0.22   |
| Черная краска                           | 0.1    |
| Грунтовые дороги                        | 0.04   |

Таблица А.10 – технические характеристики каждого из электронных компонентов, составляющих экспериментальный дизайн

| Датчики  | Технические характеристики  | Тип сигнал  |
|--|---|-------------|
| Датчик температуры окружающей среды, атмосферного давления и относительной влажности (BME280). | Температура: +/- 1С°<br>Влажность: +/- 3%<br>Давление: +/- 1 гПа. | цифровой    |
| Высокоточные цифровые датчики света (BH1750FVI)  | Диапазон Люмен: от – 1 до – 65535 люкс (16 бит).                  | цифровой    |
| датчика рабочей температуры (DS18D20).   | Диапазон температур: от – 55 до 125 ° С (12 бит).                 | цифровой    |
| Датчик напряжения и тока (INA226).   | Диапазон напряжения и тока: от 0 до 30 В и от 0 до 3 А.           | цифровой    |
| Датчик солнечного излучения (PYR20).   | Диапазон солнечного излучения: от 0 до 2000 Вт / м2.              | аналогичный |

## Продолжение таблицы А.10

| Датчики                                     | Технические характеристики   | Тип сигнал  |
|---|--|-------------|
| Часы (DS1307) и Цифровой компас (HMC5883L). | Диапазон входного напряжения: от 4,5 до 5,5 В постоянного тока.<br>Магнитометр, компас, 3-осевой цифровой компас (+/- 8 Гаусс во всем диапазоне)   | цифровой    |
| Адаптер памяти microSD                      | ---  | цифровой    |
| Модуль связи Wi-Fi (ESP8266)                | IEEE 802.11 b/g/n Wi-Fi (32 бит)   | цифровой    |
| Серводвигатели (ES08MAII)                   | Скорость работы: 0,12 сек / 60 градусов  | аналогичный |
| Микропроцессор (МЕГА 2650)                  | Ядро: 8-битный AVR.<br>Тактовая частота: 16 МГц<br>Объем Flash-памяти: 256 КБ (8 КБ занимает загрузчик)<br>Объем SRAM-памяти: 32 КБ<br>Объем EEPROM-памяти: 4 КБ, Портов ввода-вывода всего: 54, Портов с АЦП: 16. | цифровой    |
| Реле подключения                            | Напряжение: 5 В.   | аналогичный |
| Внешний источник питания                    | Диапазон входного напряжения: 0–30 В, 1,5 А  | аналогичный |
| Солнечные панели 2 (CNC85X115-18).          | Диапазон входного напряжения: 0–18 В, 0.1 А  | аналогичный |

Таблица А.11 – Процент от общей дисперсии ( $R^2$ ), которое объясняет возможные комбинации независимых переменных (метеорологических переменных) по отношению к зависимой переменной (электрической энергии)

| количество переменных | переменные | $R^2$ |
|-----------------------|------------|-------|
| 2                     | $T_a, G_h$ | 0,86  |
|                       | $T_a, H_r$ | 0,76  |
|                       | $G_h, H_r$ | 0.61  |

Продолжение таблицы А.11

| количество переменных | переменные                | $R^2$ |
|-----------------------|---------------------------|-------|
| 3                     | $T_a, H_r, G_h$           | 0.60  |
|                       | $T_a, G_h, V_v$           | 0.85  |
| 4                     | $G_h, T_a, H_r, V_v$      | 0,67  |
| 5                     | $G_h, T_a, H_r, V_v, P_a$ | 0.58  |

Таблица А.12 – Результаты измерений для Фев месяца на территории Республики Куба

| День             | СС, кВт ч/м <sup>2</sup> | СЕ, кВт ч/м <sup>2</sup> | (%)      | День   | СС, кВт ч/м <sup>2</sup> | СЕ, кВт ч/м <sup>2</sup> | (%)   |
|------------------|--------------------------|--------------------------|----------|--------|--------------------------|--------------------------|-------|
| 1-Май            | 2.002                    | 2.891                    | 30.75    | 16-Май | 4.525                    | 5.655                    | 19.98 |
| 2-Май            | 5.792                    | 7.638                    | 24.17    | 17-Май | 4.657                    | 5.117                    | 8.99  |
| 3-Май            | 5.885                    | 6.760                    | 12.94    | 18-Май | 4.657                    | 5.117                    | 8.99  |
| 4-Май            | 4.653                    | 5.406                    | 13.93    | 19-Май | 4.254                    | 5.439                    | 21.79 |
| 5-Май            | 4.722                    | 5.155                    | 8.40     | 20-Май | 7.096                    | 8.42                     | 15.72 |
| 6-Май            | 6.326                    | 8.041                    | 21.33    | 21-Май | 4.657                    | 5.117                    | 8.99  |
| 7- Май           | 4.657                    | 5.117                    | 8.99     | 22-Май | 3.525                    | 3.955                    | 10.87 |
| 8-Май            | 5.498                    | 6,169                    | 10.88    | 23-Май | 4.254                    | 5.439                    | 21.79 |
| 9-Май            | 7.096                    | 8.420                    | 15.72    | 24-Май | 6.936                    | 8.29                     | 16.33 |
| 10-Май           | 6.735                    | 7.675                    | 12.25    | 25-Май | 5.657                    | 6.117                    | 7.52  |
| 11-Май           | 4.525                    | 5.655                    | 19.98    | 26-Май | 7.256                    | 8.547                    | 15.10 |
| 12-Май           | 6.329                    | 7.809                    | 18.95    | 27-Май | 5.184                    | 6.536                    | 20.69 |
| 13-Май           | 6.218                    | 7.559                    | 17.74    | 28-Май | 6.973                    | 8.936                    | 21.97 |
| 14-Май           | 5.873                    | 6.301                    | 6.79     | 29-Май | 4.153                    | 5.534                    | 24.95 |
| 15-Май           | 5.885                    | 6.768                    | 13.05    | 30-Май | 3.153                    | 4.534                    | 30.46 |
| Среднее значение | СС= 5,30                 |                          | СТ= 6,34 |        | ΔE=17%                   |                          |       |

Таблица А.13 – Реальная энергия вырабатывается по каждой модели панели в течение нескольких месяцев

| месяц           | Янв | Фев  | Мар  | Апр  | Май  | Июн  | Июл  | Авг  | Сен  | Окт  | Ноя  | Дек  |      |
|-----------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| НС              | 4,6 | 5,5  | 6,1  | 6,5  | 6,1  | 6,3  | 6,5  | 6,5  | 5,8  | 4,9  | 4,5  | 4,1  |      |
| $E_r$<br>(кВтч) | 1   | 46,6 | 57,5 | 63,1 | 67,5 | 65,1 | 64,3 | 67,5 | 65,5 | 53,8 | 43,9 | 42,5 | 40,1 |
|                 | 2   | 45,6 | 49,3 | 60,5 | 62,4 | 60,5 | 60,5 | 64,5 | 64,5 | 55,7 | 48,6 | 43,2 | 40,7 |
|                 | 3   | 49,2 | 53,1 | 65,2 | 67,3 | 65,2 | 65,2 | 69,5 | 69,5 | 60,0 | 52,4 | 46,6 | 43,8 |
|                 | 4   | 57,0 | 61,6 | 75,6 | 78,0 | 75,6 | 75,6 | 80,6 | 80,6 | 69,6 | 60,8 | 54,0 | 50,8 |
|                 | 5   | 45,6 | 49,3 | 60,5 | 62,4 | 60,5 | 60,5 | 64,5 | 52,1 | 55,7 | 48,6 | 34,9 | 40,7 |
|                 | 6   | 48,5 | 52,4 | 64,3 | 66,3 | 64,3 | 64,3 | 68,5 | 68,5 | 59,2 | 51,6 | 45,9 | 43,2 |
|                 | 7   | 48,5 | 58,0 | 64,3 | 66,3 | 64,3 | 64,3 | 54,8 | 68,5 | 59,2 | 51,6 | 45,9 | 43,2 |
|                 | 8   | 48,5 | 52,4 | 64,3 | 66,3 | 64,3 | 64,3 | 68,5 | 68,5 | 59,2 | 51,6 | 36,7 | 43,2 |
|                 | 9   | 49,2 | 58,8 | 65,2 | 67,3 | 65,2 | 65,2 | 69,5 | 69,5 | 60,0 | 52,4 | 46,6 | 43,8 |
|                 | 10  | 41,4 | 44,7 | 54,8 | 56,6 | 54,8 | 54,8 | 58,4 | 58,4 | 50,5 | 44,1 | 39,2 | 36,9 |

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

## Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2020615141

ПРОГРАММА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ  
РАБОТЫ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский горный университет» (RU)*

Авторы: *Герра Диас Даниель (CU),  
Яковлева Эмилия Владимировна (RU)*

Заявка № 2020613791

Дата поступления 03 апреля 2020 г.

Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ 18 мая 2020 г.

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Г.П. Иллеев* Г.П. Иллеев