

На правах рукописи

ГЕРРА Диас Даниель

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Daniel Dias', enclosed within a faint rectangular border.

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

***Специальность 05.09.03 –
Электротехнические комплексы и системы***

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет»

Научный руководитель:

Доктор технических наук, доцент

Шклярский Ярослав Элиевич

Официальные оппоненты:

Семыкина Ирина Юрьевна

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет», учебно-научный центр информационных технологий обучения, директор

Синюкова Татьяна Викторовна

кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Липецкий государственный технический университет», кафедра электропривод, доцент

Ведущая организация – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина)»

Защита диссертации состоится 29 июня 2021 в 10:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.14 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия, д.2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spni.ru.

Автореферат разослан 29 апреля 2021 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КОПТЕВА
Александра Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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.

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 Абрамович 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, Kurtz, Markvart и Mattei. 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. 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 работы:

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 электроподстанции в Сантьяго-де-Куба, а также при проектировании новых подстанций при условии технических, климатических и социально-экономических ограничениях, 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.

На защиту выносятся следующие положения:

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 осуществляется 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 на следующих семинарах и конференциях: IV Всероссийская научно-практическая конференция «Энергетика и энергосбережение: теория и практика» – 2018, Кемерово, Россия; Международная научная конференция 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; 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлены общая характеристика и структура обособленного электротехнического комплекса, содержащего солнечную электроподстанцию и нагрузку, питающуюся на среднем уровне напряжения. Подробно рассмотрены предпосылки повышения энергоэффективности электротехнического комплекса. Принципиальная схема исследуемого объекта представлена на рисунке 1.

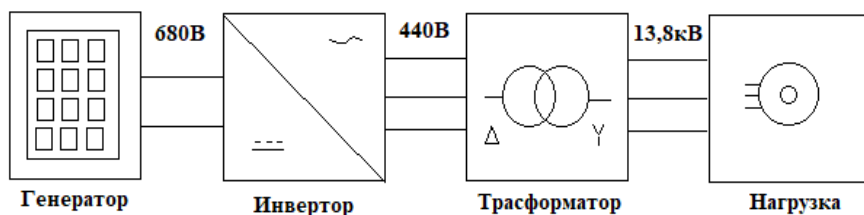


Рисунок 1 – Принципиальная схема исследуемого объекта

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.

Рассмотрены климатические условия, характерные для места расположения объекта, а именно для провинции Сантьяго-де-Куба, имеющей свои географические особенности. Определены ограничения по техническим и социально-экономическим условиям. Приведены обобщенные характеристики реального объекта, исходя из результатов проведенного анализа текущей ситуации. Установлено, что к основным недостаткам электротехнического комплекса следует отнести низкие надежность и энергоэффективность.

Во второй главе проведен анализ климатических условий и математическое моделирование составляющих исследуемого электротехнического комплекса. На основе анализа современных подходов к решению задач по созданию системы электроснабжения с применением солнечных электростанций, было установлено, что при оценке эффективности их использования следует учитывать пять климатических факторов. А именно: солнечное излучение (Gh); температуру окружающей среды (Ta); атмосферное давление (Pa); относительную влажность (Hr) и скорость ветра (Vv). Для дальнейшего анализа значимости выявленных факторов, влияющих на эффективность работы солнечной электроподстанции, был проведен анализ их характеристик. Для этого были проведены

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 были использованы уже имеющиеся данные в режиме реального времени, полученные от спутниковых систем, климатические атласы, а также полевые замеры солнечной радиации непосредственно на объекте исследования. В работе были проанализированы существующие математические модели элементов исследуемого электротехнического комплекса для дальнейшего создания обобщенной модели, на основе которой производилась оценка относительной значимости каждого фактора.

В третьей главе представлена разработанная принципиальная схема имитационной модели, показанная на рисунке 2.

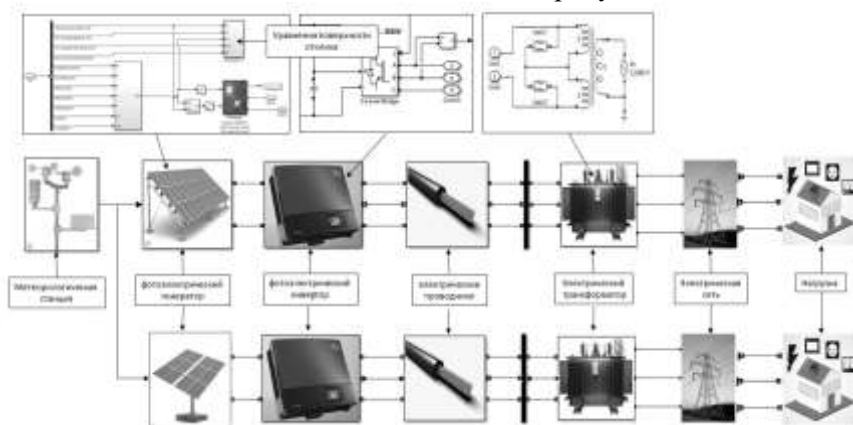


Рисунок 2 – Схема математической модели, разработанной в MATLAB / SIMULINK в провинции Сантьяго-де-Куба, Республика Куба

Полученные результаты моделирования в зависимости от указанных выше факторов позволили создать математическую модель генерации электроэнергии в виде функции отклика (1):

$$\mathcal{E} = f(Ta, Gh, Hr, Vv, Pa). \quad (1)$$

Модель создавалась для двух типов солнечных батарей: стационарных (неподвижных) и с системой слежения (подвижных с мониторингом солнечного излучения).

Для выявления влияний каждого фактора в отдельности на величину генерируемой энергии на первом этапе был проведен корреляционный анализ. Результаты анализа проиллюстрированы рисунком 3.

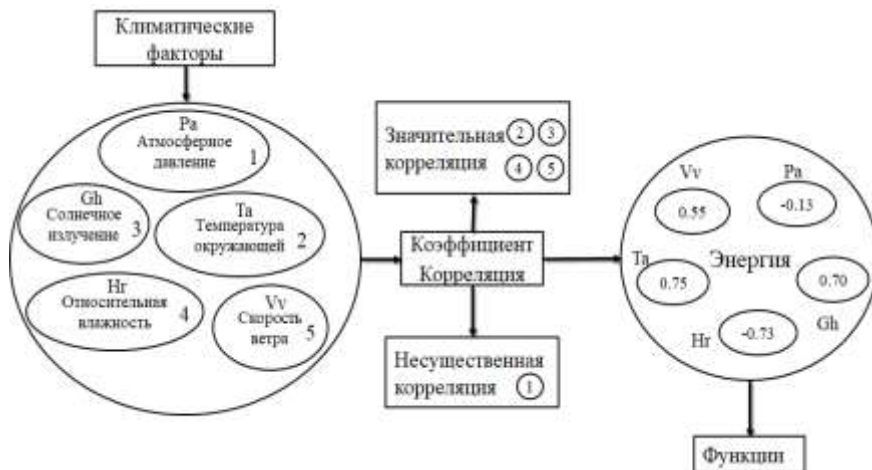


Рисунок 3 – Определение корреляции климатических переменных с энергией, производимой комплексами с солнечными модулями для региона Сантьяго-де-Куба, Республика Куба
Отсюда был сделан вывод, что наибольшей связью с энергией обладают Gh, Ta и Vv. Для окончательного выбора определяющих факторов был применен метод PCA, который подтвердил результаты корреляционного анализа с одним важным дополнением: для условий Сантьяго-де-Куба можно использовать всего лишь два фактора: Gh и Ta. Это утверждение было проверено и факторным анализом, который положен в основу дальнейшего выбора количества факторов. В этом случае основным показателем принят коэффициент детерминации R^2 (таблица 1).

Таблица 1 – Коэффициент детерминации

Количество переменных	2	3	4	5
Переменные	T_a, G_h	T_a, H_r, G_h	G_h, T_a, H_r, V_v	G_h, T_a, H_r, V_v, P_a
	T_a, H_r			
	G_h, H_r			
R^2	0.86	0.60	0.67	0.58
	0.76			
	0.61			

В результате статистическая модель с двумя параметрами принимает вид (2):

$$\dot{Q} = 132 + 4,09 * G_h - 24,8 * T_a. \quad (2)$$

Кроме этого было проведено исследование взаимной погрешности между результатами, полученными по имитационной и статистической моделям. Сравнение производилось для двух режимов: 1-ый – максимальные климатические условия ($G_h=1000 \text{ Вт/м}^2$ и $T_a=32^\circ\text{C}$); 2-ой – номинальные условия ($G_h=1000 \text{ Вт/м}^2$ и $T_a=25^\circ\text{C}$) для стационарной системы и системы со слежением при учете 2-х или 3-х факторов. Меньшая погрешность наблюдается при использовании 2-х факторной модели и составляет менее 6%. Отсюда был сделан заключительный выбор в пользу учета только двух факторов, как для имитационной так и для статистической модели.

Следующий шаг исследования заключался в сравнении величины генерируемой энергии в зависимости от климатических условий и технического исполнения системы. Результаты исследования приведены на рисунках 4 и 5. Анализ полученных результатов указывает на существенную разницу в получении энергии, как при различных климатических условиях ($\Delta \dot{Q} = 7\%$), так и при различных системах (до 43 %).

В конце третьей главы приведена разработанная экспериментальная модель, схемное решение которой показано на

рисунке 6. Модель используется для подтверждения в реальных условиях результатов, представленных выше.

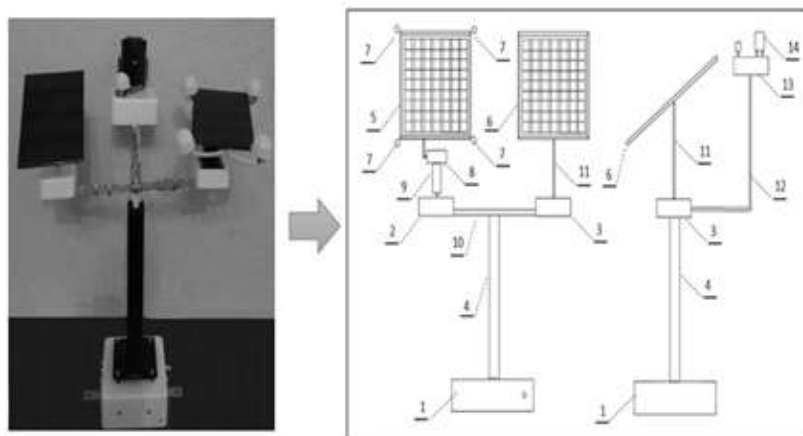


Рисунок 6 – Физическая модель

Физическая модель состоит из следующих компонентов: 1- солнечная панель малой мощности; 2- датчик солнечного света; 3. датчик 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- серводвигатели для вертикального поворота; 10- модуль связи Wi-Fi; 11- микропроцессор; 12- реле подключения; 13- аккумулятор; 14- внешний источник питания.

Таким образом, в работе определены факторы, которые должны быть учтены при моделировании значения генерируемой мощности в условиях провинции Сантьяго-де-Куба, а также оценена энергоэффективность применения системы слежения.

В четвертой главе 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 как выполняется стратегическая задача увеличения мощностей, поставляемых в национальную электрическую сеть. На рисунке 7 представлена блок-схема алгоритма.

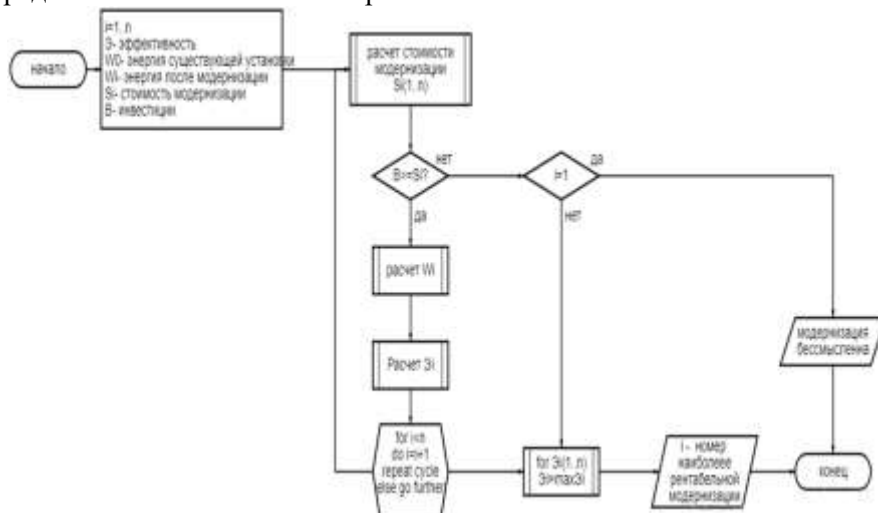


Рисунок 7 – Блок-схема алгоритма выбора типа модернизации

Работа алгоритма заключается в следующем. В начале необходимо определить и задать следующие параметры – начальная 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, осуществляется выбор различных видов модернизации. Затем определяется количество решений модернизации. Первым расчетом в алгоритме является расчет стоимости каждого способа модернизации. 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 зависимостей (рисунок 8), выбирается наиболее эффективное решение с точки зрения прироста мощности и с наименьшими затратами. 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.

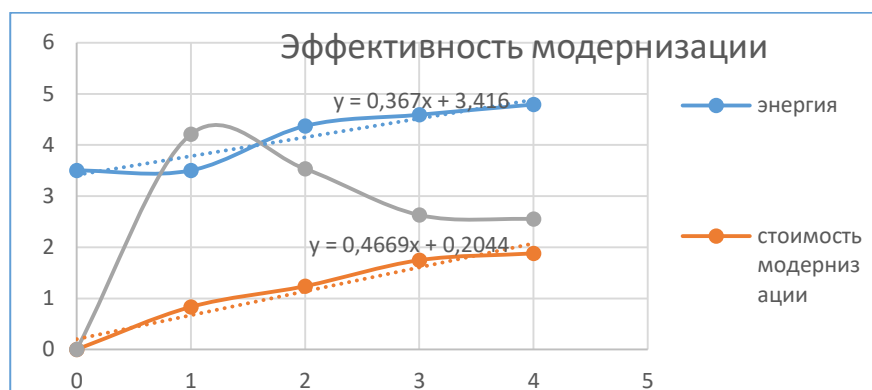


Рисунок 8 – Эффективность модернизации (Ось X - это степень модернизации, ось Y - энергия и затраты)

Анализ результатов показывает, что наиболее эффективным решением с точки зрения экономических затрат и прироста энергии, генерируемой солнечной электростанцией, является второй сценарий и второй тип модернизации. Так как в этом случае, прирост энергии составляет наибольшее 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. Таким образом в работе сформирован алгоритм варианта модернизации электротехнического комплекса с учетом специфики развития экономики Республики Куба.

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 солнечных электростанций 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. 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.

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

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

8. 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%.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus

5. Gerra, D.D. Sun tracking system for photovoltaic batteries in climatic conditions of the Republic of Cuba / D.D. Gerra, E.V. Iakovleva. – DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012155. – Текст: электронный // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing. – 2019. – Vol. 643(1). – P. 1-6.

6. Guerra, D.D. Mathematical modeling of parameters of solar modules for a solar power plant 2.5 MW in the climatic conditions of the Republic of Cuba / D.D. Guerra, E.V. Iakovleva. – DOI: 10.1051/e3sconf/201914004013. – Текст: электронный // E3S Web of Conferences. – EDP Sciences. – 2019. – Vol. 140. – P. 1-7.

7. Guerra, D.D. Alternative measures to reduce carbon dioxide emissions in the republic of Cuba / D.D. Guerra, E.V. Iakovleva, A.Y. Shklyarskiy. – DOI: 10.12911/22998993/119800. – Текст: электронный // Journal of Ecological Engineering. – Polish Society of Ecological Engineering (PTIE) – 2020. – Vol. 21(4). – P. 55-60.

8. Guerra, D.D. Improving the efficiency of the use of photovoltaic stations in the republic of Cuba / E.V. Iakovleva, D.D. Guerra. – DOI: 10.1088/1742-6596/1753/1/012056. – Текст: электронный // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing Ltd. – 2020. – Vol. 1753(1). – P. 1-7.

Свидетельство:

9. 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; опублик. 18.05.2020 – 1 с

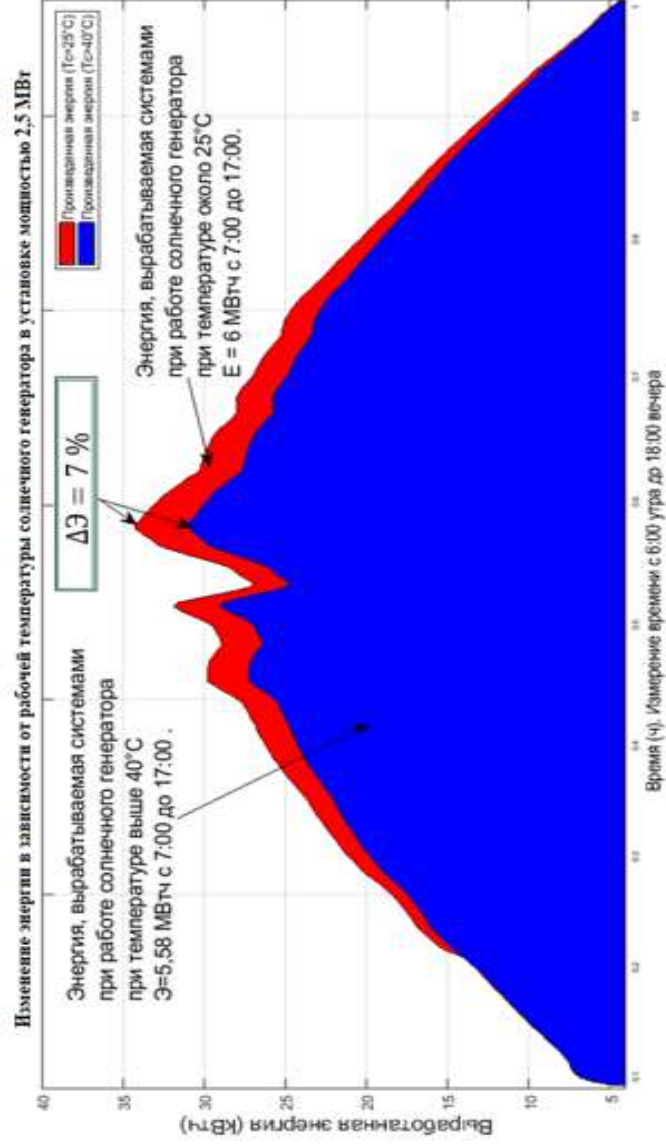


Рисунок 4 – Электроэнергия, поставляемая солнечной системой мощностью 2,5 МВт

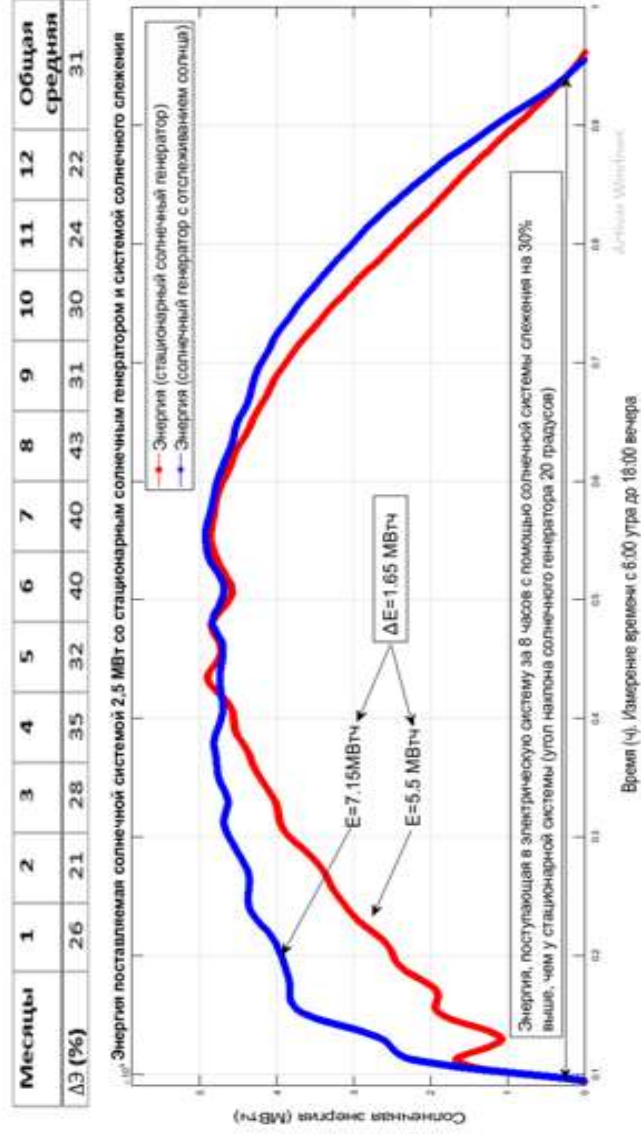


Рисунок 5 – Сравнение энергии, вырабатываемой стационарной солнечной системой мощностью 2,5 МВт с системой слежения