

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«Севастопольский государственный университет»

На правах рукописи

Абдали Лаит Мохаммед Абдали

**Разработка системы управления и алгоритма повышения эффективности
работы гибридных ветро-солнечных электростанций**

Специальность 2.4.5 - Энергетические системы и комплексы

Диссертация

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор техн. наук, профессор,

Якимович Борис Анатольевич

Севастополь – 2023

БЛАГОДАРНОСТЬ

Печатные страницы этой диссертации содержат в себе гораздо больше, чем просто результат многолетних исследований. На этих страницах также отражены отношения со многими щедрыми и вдохновляющими людьми, которых я встретил с начала своей аспирантской работы. Список длинный, но я ценю вклад каждого из них вклад в свое развитие как ученого и преподавателя.

Во-первых, я хотел бы выразить искреннюю благодарность моему главному научному руководителю, профессору Якимовичу Борису Анатольевичу, за поддержку и поощрение моей кандидатской диссертации. А также за его терпение, мотивацию, энтузиазм и огромные знания. Его руководство помогло мне на протяжении всего времени моих исследований и написания этой диссертации. Я не мог себе представить лучшего консультанта и наставника для моей кандидатской степени. В течение долгих месяцев, которые я потратил, работая над кандидатской диссертацией. Я хотел бы поблагодарить всех сотрудников кафедры «Энергетические системы и комплексы традиционных и возобновляемых источников энергии», которые были очень терпеливы и сотрудничали со мной.

Особую благодарность хочу выразить своей семье. Прежде всего, моим маме и папе за то, что они родили меня и поддерживали меня духовно на протяжении всей моей жизни. Кроме того, я хотел бы выразить большое спасибо моей жене и детям за их помощь, поддержку, поощрение и терпение в годы моего обучения.

Я также хотел бы поблагодарить всех моих друзей и коллег за поддержку меня на протяжении выполнения диссертации.

Но прежде всего, я благодарю и славлю Бога за то, что он благословил меня выполнение моей диссертация.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	7
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В МИРОВОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ВИДОВ ЭНЕРГИИ	13
1.1 Обзор использования установок для преобразования возобновляемых видов энергии	13
1.2 Гибридные системы повышенной эффективности на основе ВИЭ, работающие совместно с сетью.....	16
1.2.1 Преобразование солнечной энергии	17
1.2.2 Ветровая энергетика.....	19
1.2.3 Аккумуляция энергии	21
1.3 Описания модели гибридных системы.....	23
1.3.1 Анализ и математическое моделирование работы солнечного элемента, фотоэлектрической установки, модуля и массива	25
1.3.1.1 Математическое представление для фотоэлектрической ячейки	27
1.3.1.2 Математическое представление для фотоэлектрического модуля	29
1.3.2 Анализ и математическое моделирование работы ротора ветроэнергетикой установки и их характеристик	31
1.3.2.1 Математическое моделирование работы ВЭУ	35
1.3.2.2 Характеристики мощности ротора ВЭУ	38
1.3.3. Анализ и математическое моделирование работы аккумуляторных батарей.....	42
1.3.3.1 Механизм работы литий-ионного аккумулятора	43
1.3.3.2 Математическое моделирование работы АКБ	45

1.3.3.3 Эффективность работы аккумулятора и влияние температуры.....	48
1.4 Оптимизации гибридных систем энергоснабжения	48
Выводы по главе 1.....	49
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ КОМПОНЕНТОВ ГИБРИДНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ.....	52
2.1 Математическое моделирование работы солнечной установки.....	52
2.1.1 Повышение эффективности фотоэлектрической панели за счет использования метода отбора в точке максимальной мощности (ТММ).....	62
2.1.1.1 Метод возмущения и наблюдения (P&O):.....	62
2.1.1.2 Метод инкрементной проводимости (ИП):	63
2.1.2 Сравнение методик отбора максимальной мощности и выбор оптимального метода исследования	65
2.1.3 Предлагаемый алгоритм инкрементной проводимости (ИП)	70
2.1.3.1 Результаты моделирования	74
2.1.3.2 Результаты экспериментов.....	76
2.1.4 Производительность улучшенного алгоритма инкрементной проводимости для фотоэлектрической системы в условиях частичного затенения.....	79
2.2 Математическое моделирование работы ветроэлектрической установки .	82
2.2.1 Модель преобразования ветровой энергии и ветрогенераторной системы СГПМ.....	83
2.2.2 Повышение эффективности работы ветровой турбины за счет использования метода отбора максимальной мощности (ТММ)	84

2.2.2.1 Контроль соотношения скорости конца лопасти и коэффициента использования мощности.....	84
2.2.2.2 Метод возмущения и наблюдения (P&O) для ветровых турбин.....	85
2.2.2.3 Разработка метода управления углом тангажа.....	86
2.2.2.4 Предлагаемый метод ТММ	87
2.3 Математическое моделирование работы аккумуляторных систем.....	91
2.4 Теория принятия решений для гибридных ветро-солнечных систем.....	97
Выводы по главе 2.....	102
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ГИБРИДНЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК НА ПОЛИГОНЕ СЕВАСТОПОЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА	105
3.1 Измерение температуры и потока солнечной радиации на территории базы отдыха Севастопольского государственного университета.....	107
3.2 Измерение ветроэнергетического потенциала базы отдыха Севастопольского государственного университета	109
3.3 Результаты исследования гибридной ветро-солнечной установки на полигоне Севастопольского государственного университета	111
3.4 Результаты моделирования гибридных ветро-солнечных электростанций.....	112
Выводы по главе 3.....	120
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК В ГОРОДЕ АЛЬ-НАДЖАФ В ИРАКЕ.....	122
4.1 Измерение температуры и потенциала солнечной радиации в провинции Аль-Наджаф в Ираке.....	123

4.2 Измерение ветроэнергетического потенциала на территории города Аль-Наджаф	128
4.3 Результаты моделирования гибридных ветро-солнечных установок на территории города Аль-Наджаф в Ираке	130
4.4 Экспериментальное исследование гибридной ветер-солнечной системы	131
4.5 Техничко-экономическая оценка автономной гибридной ветро-солнечной системы	155
Выводы по главе 4.....	162
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	164
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	169
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	170
Приложение А.	184
Приложение Б.....	189

Введение

Актуальность. Быстрое развитие технологий солнечной (фотоэлектрической) и ветровой энергии в последние годы сделало эти технологии конкурентоспособными альтернативами традиционным энергетическим системам. Параллельно с этим развитием фотоэлектрические, ветровые и гибридные энергетические системы внесли значительный вклад в повседневную жизнь в развивающихся странах, где треть населения мира живет без электричества. Многие пытаются расширить свои энергосистемы, чтобы удовлетворить спрос на электрификацию сельских районов. Однако распространение коммунальных услуг из городов в отдаленные села редко бывает доступной роскошью. Таким образом, даже несмотря на то, что они производят меньше энергии по сравнению с центральными электростанциями, гибридные системы могут удовлетворить скромные потребности деревень. Необходимое потребление электроэнергии на душу населения может быть обеспечено гибридной системой электроэнергии.

Одной из технических проблем для фотоэлектрических и ветроэнергетических технологий является поиск точки максимальной мощности при работе модулей из-за изменения климатических, радиационных и температурных условий и изменений скорости ветра. Важность этой работы заключалась в разработке алгоритмов поиска и выбора точки максимальной мощности, и стратегии управления, что является эффективным инструментом для оптимизации производительности гибридной энергосистемы.

Также важность этой работы заключается в изучении возможностей использования гибридных ветро-солнечных систем для снижения дефицита электроэнергии в Ираке. Это достигается за счет повышения эффективности системы управления при резких изменениях климатических условий, что позволяет повысить объем выработки электроэнергии на 10-15 %. В диссертационной работе представлены результаты моделирования, показана важность проведенных

экспериментов, предложена гибридная ветро-солнечная система. Результаты исследований позволяют энергетическим компаниям получать необходимую информацию о возможности инвестиций в проекты для установки гибридных ветро-солнечных систем в провинции Наджаф в Ираке.

Степень разработанности темы исследования

Вопросы разработки гибридных энергетических установок на основе систем возобновляемой энергетики рассматриваются в работах зарубежных авторов: Фреде Блаабьберг (Ольборгский университет, Дания), Г. Смайсим (Университет Куфы, Ирак) и Т. Хатиба (Национальный университет Ан-Наджа, Палестина). Работа автономных гибридных ветро-солнечных систем для обеспечения электрической энергией удаленных автономных потребителей рассматривается такими авторами, как Дж. П. Райхлинг (Университет Миннесоты, США), Джон Калделлис (Университет Западной Аттики, Греция). Методы, используемые для достижения максимальной мощности от фотоэлектрических систем, включающие метод инкрементной проводимости, были предложены и реализованы авторами П. Лютанакул (Технологический университет Северного Бангкока, Таиланд) и П. Л. Чэпмен (Университет Иллинойса Урбана-Шампейн, США)

Работы по системам управления автономными фотоэлектрическими системами также были проведены следующими российскими учеными: М. С. Андреевым, В.В. Елистратовым, А. К. Сухенко, Е. Ю. Тимченко, А. В. Борисевичем, Л.Ю. Юферевым, Т.Н. Зайченко, В. И. Велькиным, Э. А. Бекировым, Б. А. Якимовичем, П. Н. Кузнецовым, В. В. Кувшиновым.

Цель работы. Целью работы является разработка и исследование повышения эффективности энергетического комплекса с использованием гибридных ветро-солнечных электростанций и системы управления ими с применением предложенных модифицированных алгоритмов: инкрементальной проводимости; возмущения и наблюдения.

Задачи исследования:

1. Проведение анализа основных типов, выпускаемых промышленностью гибридных ветро-солнечных установок.
2. Анализ методов и алгоритмов отбора точек максимальной мощности, выбор рациональной методики и усовершенствования алгоритма управления фотоэлектрическими батареями.
3. Разработка алгоритма для повышения эффективности генерации электрической энергии ветровой турбины.
4. Выполнено моделирование системы производства энергии гибридной ветро-солнечной установки.
5. Расчет экономической эффективности применения модифицированных алгоритмов при работе гибридной ветро-солнечной установки в городе Наджаф в республике Ирак.

Объект исследования – комбинированные электростанции на основе серийных фотоэлектрических модулей и ветровых турбин для работы в Республике Ирак

Предмет исследования – электрические, энергетические и технико-экономические характеристики, алгоритмы и модели гибридных ветро-солнечных электростанций.

Научную новизну работы:

1. Предложен и исследован с применением имитационного моделирования эффективный метод управления выходными параметрами гибридной ветро-солнечной энергосистемы.
2. Разработан алгоритм инкрементной проводимости управления отбором электрической энергии от солнечных панелей, который позволяет снизить время установки на 2 секунды в точку максимальной мощности при изменении потока

солнечной радиации, что повышает эффективность работы фотоэлектрической системы на 4,3%.

3. Усовершенствован алгоритм управления режимами отбора электрической энергии от ветрогенератора на 8%, позволяющий снизить время установки в точку максимальной мощности при изменении скорости ветрового потока.

4. Разработана принципиальная модель комбинированной гибридной энергетической системы с повышенной генерацией электрической энергии на 12% за счет применения в системе управления модифицированными алгоритмами инкрементной проводимости, возмущения и наблюдения

Теоретическая и практическая значимость работы

Результаты работы внедрены в Республике Ирак и на экспериментальной площадке испытательного полигона в Институте ядерной энергии и промышленности Севастопольского государственного университета СевГУ, в виде гибридной ветро-солнечной электростанции и с использованием модифицированного алгоритма управления энергией что повышают эффективность производства электроэнергии.

Методология и методы исследования. В работе использовался метод многофакторного анализа, метод определения электрической мощности и КПД, основанный на прямых измерениях силы тока, напряжения и мощности, теория подобия и математическая статистика. Математическая обработка и компьютерное моделирование исследований проводилась с использованием прикладных программ Matlab, HOMER.

Личный вклад автора заключался в постановке задач исследования и реализации целей, обоснованиях научных положений, систематизации аспектов и условий, объясняющих потенциал и экономическую целесообразность использования ВИЭ для электроснабжения удаленных потребителей. Разработка

моделей и алгоритмов, а также анализ и обобщение результатов практических и теоретических исследований гибридной ветро-солнечной системы с использованием программы Matlab, формулирование основных выводов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты имитационного моделирования выходных энергетических характеристик при изменении различных значений солнечной инсоляции, скоростей ветрового потока, атмосферной температуры, и других климатических факторов.

2. Модифицированный алгоритм инкрементной проводимости управления режимами отбора электрической энергии от солнечных панелей, для отслеживания точки максимальной мощности фотоэлектрического модуля при быстро меняющемся уровне солнечной инсоляции.

3. Результаты использования модифицированного алгоритма управления режимами отбора электрической энергии от ветрогенератора для отслеживания точки максимальной мощности.

4. Принципиальная модель комбинированной гибридной энергетической системы с повышенной генерацией электрической энергии за счет применения системы управления, с использованием модифицированного метода отслеживания точек максимальной мощности и улучшенной стабильности работы системы.

Степень достоверности и апробации результатов определяется корректным применением общепринятых положений теории имитационного моделирования и практической оценки техно-экономического анализа, методов статистического наблюдения и обработки информации. Достоверность научных выводов и рекомендаций основана на экспериментальных результатах, полученных автором посредством исследований, и базируется на доказанных и корректно используемых выводах фундаментальных и прикладных наук, которые нашли применение в диссертационной работе.

Апробация работы. Результаты исследований по теме диссертации докладывались на международной научно-практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность» 23 – 26 сентября 2019 года, СевГУ- г. Севастополь; На всероссийской научной конференции 12 молодежной школы с международным участием (24–25 ноября 2020) МГУ Имени М.В. Ломоносова - г. Москва; На научно-технической конференции «Актуальные Проблемы Электроэнергетики» 17 декабря 2021 года, НГТУ им. Р.Е. Алексеева - г. Нижний Новгород; На второй Международной научно-практической конференции «Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов» 26–28 апреля 2022 года, Национальный исследовательский университет ТПУ - г. Томск; научных семинарах кафедры ВИЭЭСиС СевГУ 2018-2023 годы.

Публикации. По результатам диссертационной работы опубликованы 42 научные работы, из них 24 статьи в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, в том числе 14 статей в журналах, индексируемых в Scopus и WoS, а также 18 тезисов докладов и статей в научных журналах, индексируемых в РИНЦ.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Основная часть работы состоит из 192 страниц печатного текста, 109 рисунков и 23 таблиц. Библиографический список содержит 111 наименований источников.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В МИРОВОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ВИДОВ ЭНЕРГИИ

1.1. Обзор использования установок для преобразования возобновляемых видов энергии

Система, которая объединяет различные источники энергии, называется комбинированной или гибридной системой. Такая система не является новой концепцией, скорее она получает все больше внимания в течение последних двух десятилетий многими исследователями, такими как Ян Х. [1]. Он рекомендовал оптимальную модель проектирования гибридной солнечно-ветровой системы, которая использует батареи для расчета оптимальных конфигураций системы в Китае. В результате были обнаружены хорошие взаимодополняющие характеристики солнечной и ветровой энергии, и оказалось, что гибридная система способна работать очень эффективно в течение всего года с минимальными случаями чрезмерного разряда батареи. Шакья БД. [2] изучил возможность создания автономной гибридной ветро-фотоэлектрической системы, включающей хранилище сжатого водорода в Австралии. Он пришел к выводу, что, если произойдет значительное изменение цен на элементы, связанные с подсистемой хранения водорода, затраты на использование систем накопления и хранения энергии для комплексов на основе возобновляемой энергетики будут более экономичными для автономных установок. Экрен О. [3] показал оптимальную процедуру оптимизации гибридной системы ветро-фотоэлектрического комплекса в Турции, при помощи анализа он рассчитал затраты на установку гибридной энергетической системы, как альтернативу строительству линий электропередачи.

Эль-Шаттер ТФ. [4] использовал нечеткое логическое управление для достижения максимального отслеживания мощности как для фотоэлектрического преобразования энергии, так и для преобразования энергии ветрового потока в

гибридных фотоэлектрических-ветровых системах и с использованием топливных элементов. Кроме того, Райхлинг Дж.П. [5] смоделировал гибридную ветро-солнечную электростанцию в юго-западной Миннесоте в течение 2-летнего периода, используя почасовые данные о ветре и солнечном излучении. Он пришел к выводу, что такой анализ в сочетании с затратами, связанными с резервными генерирующими мощностями и затратами на ископаемое топливо и его транспортировку, поможет установить общую пользу для потребителей при строительстве гибридных солнечно-ветровых электростанций и может определить относительную экологическую эффективность этих электростанций.

Чтобы фотоэлектрическая система могла производить максимально возможную мощность, было разработано множество методов и алгоритмов отслеживания максимальной мощности. Гимазов Р. У. [6] и Тарола Д. И. [7] предложили наиболее широко используемый метод, известный как метод возмущения и наблюдения. В статьях различных авторов была описана реализация отслеживания точки максимальной мощности (ТММ) на основе микроконтроллера. Были реализованы два алгоритма отслеживания, а именно алгоритм возмущения и наблюдения и алгоритм максимального напряжения точки мощности (ТММ). Метод ТММ был испытан при различных условиях инсоляции и нагрузки. Было показано, что с помощью алгоритма возмущения и наблюдения контроллеру потребовалось относительно небольшое время для отслеживания точки максимальной мощности. Другие стратегии, используемые для достижения максимальной мощности от фотоэлектрических систем, включают метод инкрементной проводимости и также метод дробного напряжения разомкнутой цепи, который подробно обсуждался Поповым С. А. [8].

Исследователь Кувшинов В. В. [9] из Севастопольского государственного университета реализовал модель фотоэлектрической установки, ориентированной на направление максимального потока солнечной радиации, с помощью программного пакета Matlab/Simulink. Энергетический эффект был получен за счёт

изменения освещенности и температуры рабочей поверхности элемента. За основу, в качестве эталонного входа была взята температура окружающей среды, а солнечная инсоляция в качестве уникального изменяющегося параметра. Изменение характеристик выходного тока и мощности было смоделировано и проанализировано с использованием предложенной фотоэлектрической модели. Проверка модели была окончательно подтверждена экспериментальным измерением.

Автор Буяльский В. И. [10] смоделировал систему, которая включала ветровую турбину, генератор постоянного тока, шину постоянного тока с конденсатором и инвертор источника напряжения с регулируемой по току широтно-импульсной модуляцией (PWM). Полное моделирование ветроэнергетической системы с синхронным генератором на постоянных магнитах (PMSG) и интерфейсом силового электронного преобразователя вместе со схемой управления было разработано с использованием Matlab/Simulink.

Ученый из Крымского Федерального университета им. Вернадского Бекиров Э. А. [11] использовал систему ветровых турбин на основе генератора PMSG и объяснил, что по сравнению с индукционными генераторами, PMSG имеет меньший физический размер и меньший момент инерции, что означает более высокую надежность и удельную мощность на единицу объема.

Авторы Якимович Б. А. [12] и Кузнецов П. Н. [13] представили обзор одно- и многоцелевых методов оптимизации систем возобновляемой энергии, в частности энергии ветра, солнечной энергии, геотермальной энергии и гибридных энергетических систем, а также обзоры существующих систем и программного обеспечения для моделирования, которые состоят из имитационного моделирования для не подключенных к сети гибридных PV-WT систем, чтобы получить оптимальное решение реальных проблем оптимизации, таких как оптимальная конфигурация гибридной системы возобновляемых источников энергии которая имеет переменные ресурсы, такие как энергия ветра и солнца.

Задача оптимизации требует достойного компромисса между точностью подхода к оптимизации и детализацией модели гибридной системы.

Автор Казем Х. А. [14] исследовали нехватку электроэнергии и многие проблемы в энергетике Ираке. Это исследование показало, что энергия солнца, ветра и биомассы в настоящее время используется недостаточно, но эти виды энергии могли бы сыграть важную роль в будущем возобновляемых источников энергии Ирака. Кроме того, необходимо изучить потенциал энергии морского ветра в Персидском заливе (недалеко от Басры в южной части Ирака). Они упомянули, обсудили и рассмотрели попытки правительства Ирака использовать возобновляемые источники энергии.

В представленной работе рассматриваются вопросы использования возобновляемых энергетических ресурсов в энергетических отраслях Ирака. Основное внимание уделяется использованию нетрадиционных источников энергии, таких как ветровые и солнечные установки.

1.2 Гибридные системы повышенной эффективности на основе ВИЭ, работающие совместно с сетью

Энергия считается возобновляемой, если ее источник является регенеративным или не «исчерпан» в масштабе человеческого времени и использование которого не влияет на природные ресурсы для будущих поколений. Обычно «возобновляемым источником энергии» считаются солнце, ветер, море, геотермальная энергия, в то время как «не возобновляемый» ресурс — это природный ресурс, который нельзя производить, выращивать, генерировать или использовать в масштабах, которые могут поддерживать уровень его потребления. Ископаемое топливо (например, уголь, нефть и природный газ) и ядерная энергия (уран) являются примерами. Эти ресурсы часто существуют в фиксированном количестве или потребляются намного быстрее, чем природа может их создать. В этом контексте часто существует различие между «классическими»

возобновляемыми источниками (в основном гидроэлектрическая и геотермальная энергия) и «новыми» возобновляемыми источниками, такими как солнечная энергия, ветер и биомасса. В контексте электроэнергии возобновляемые источники также подразделяются на «программируемые источники» и «непрограммируемые источники», так как они могут быть запланированы по запросу на энергию или нет. Согласно определению Gestore dei Servizi Elettrici, первая группа включает гидроэлектростанции с водохранилищем и бассейном, твердые отходы, биомассу, установки, обрабатываемые с использованием ископаемого топлива, топлива или технологических остатков, а вторая группа (непрограммируемая): проточные гидроэлектростанции, ветровые, геотермальные, солнечные, биогазовые.

1.2.1 Преобразование солнечной энергии

Солнце является первоисточником почти всей энергии, используемой на Земле. Земля получает запас энергии от солнца, так как количество энергии, поступающей на планету каждый час, равно общему количеству потребляемой человечеством энергии за многие годы.

Свет, попадающий на панели, преобразуется в чистую электрическую энергию, которая поступает в виде постоянного тока. При установке инвертора он преобразует постоянный в переменный ток, поэтому он синхронизирован с электросетью и может использоваться в обычном режиме. Затем чистое электричество поступает в сеть с помощью платы предохранителей. С помощью счетчиков можно измерить и зарегистрировать количество произведенной неиспользованной электроэнергии, любая неиспользованная электроэнергия может быть продана обратно поставщику электроэнергии.

Для использования доступно множество видов фотоэлектрических панелей. На рисунке 1.1 показано размещение солнечных панелей на крыше здания. Их можно легко установить на дом, и они работают очень просто – подходит любая крыша, выходящая на южную сторону.



Рисунок 1.1. Солнечная панель на крыше здания

Солнечные батареи предназначены для выработки определенного количества электроэнергии при определенных условиях. При определении энергетических характеристик массива обычно учитываются следующие факторы:

- Характеристика электрических параметров солнечного элемента.
- Определение факторов ухудшения, связанных с проектированием и сборкой массива.
- Преобразование экологических соображений в рабочие температуры солнечных элементов.
- Расчет выходной мощности массива.

Требуемое количество электроэнергии может быть определено сочетанием следующих критерий производительности:

Выходная мощность – мощность (Вт), доступная регулятору мощности, указываемая либо как пиковая мощность, либо как средняя мощность, произведенная в течение одного дня.

Выход энергии – количество энергии (Вт*ч), произведенной за определенный период времени [15].

Параметры являются выходными данными на единицу площади массива (Вт.ч/м²) и выходными данными на единицу стоимости массива (Вт*ч/\$).

1.2.2 Ветровая энергетика

Энергия ветра является источником возобновляемой энергии, получаемой из воздушных потоков, протекающих по поверхности земли. Ветровые турбины собирают такую кинетическую энергию и преобразуют ее в полезную энергию, которая может обеспечивать электричеством дом, школу, ферму или бизнес-приложения в небольших (жилых) или крупных (коммунальные) масштабах.

Эти растущие тенденции можно объяснить многогранными преимуществами, связанными с энергией ветра:

- Устойчивая энергетика: ветер является возобновляемым источником энергии; оно неисчерпаемо и не требует никакого «топлива», кроме ветра, который дует по земле.
- Зеленая энергия: электричество, произведенное с помощью энергии ветра, считается «чистым», поскольку его производство не вызывает загрязнения или выброса парниковых газов. Поскольку проблемы со здоровьем и окружающей средой в настоящее время считаются серьезной угрозой для здоровья человека и окружающей среды, потребность в экологически чистых источниках энергии растет.
- Доступность: энергия ветра является очень конкурентоспособным источником электроэнергии. Поэтому ветровые турбины производятся и эксплуатируются по всему миру.
- Экономическое развитие: ветровая энергия не только доступна по цене, но и является источником электроэнергии местного производства, который позволяет сообществам сохранять энергетические доллары и инвестировать их в свою экономику. Создание рабочих мест (производство, обслуживание, строительство и эксплуатация) и увеличение налоговой базы являются другими экономическими преимуществами для стран, использующих энергию ветра.

По состоянию на 2018 год энергия ветра играет ведущую роль в сфере возобновляемых источников энергии во всем мире. Согласно официальным отчетам [16], в глобальном масштабе была достигнута ошеломляющая совокупная мощность более 500 ГВт. Китай, США и Германия занимает высокое место в списке стран-производителей энергии, в то время как ранее региональные “игроки”, такие как Индия и Бразилия, начинают играть доминирующую роль в глобальном масштабе. В Европейском союзе государства-члены договорились увеличить свои инвестиции в ветроэнергетику, чтобы обеспечить не менее 20% от общей требуемой мощности к 2020 году. Совсем недавно, Европейская комиссия выступила с предложением сделать ЕС мировым лидером в области возобновляемых источников энергии, достигнув целевого показателя не менее 27% [17].

Помимо широкой межправительственной поддержки в виде субсидий, ветроэнергетика также привлекла внимание благодаря своей финансовой жизнеспособности. С крупными ветроэлектро станциями с еще более крупными турбинами (максимальная мощность которых, как ожидается, достигнет 15 МВт к 2024 году) энергия ветра может почти вдвое снизить их стоимость [18].

Эти растущие тенденции в оффшорной ветроэнергетике являются результатом как эффективности, снижения затрат на строительство / эксплуатацию, так и технологических достижений, которые позволяют успешно устанавливать более крупные ветровые турбины. В частности, размер ветряных турбин, как ожидается, будет увеличиваться (см. рисунке 1.2) как для того, чтобы использовать преимущества более сильных ветров, так и для увеличения рабочей площади ротора для достижения большего улавливания энергии. Диаметр современных ветряных турбин не превышает 120 м. Тем не менее, были объявлены еще более крупные турбины, которые могут легко превышать диаметр 210 м и иметь номинальную мощность 12 МВт [19,20].

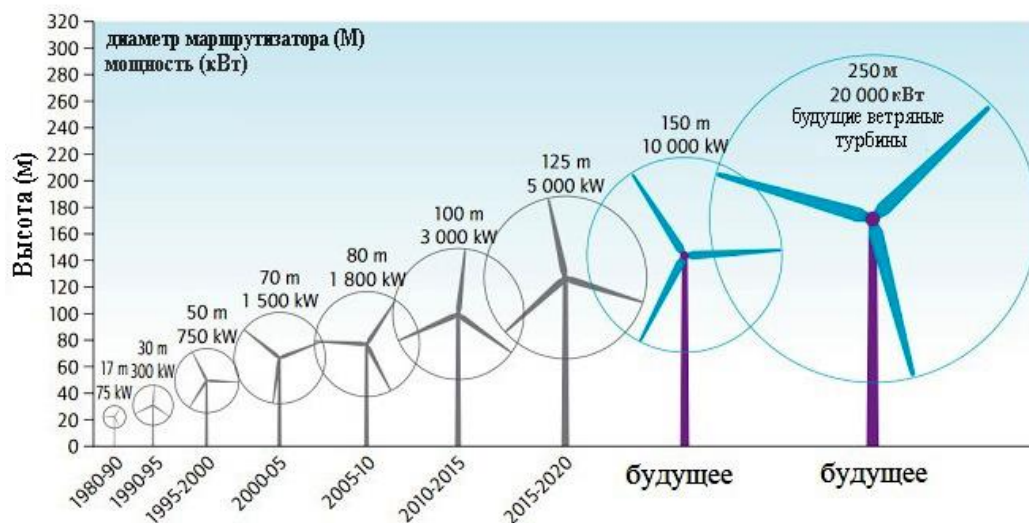


Рисунок 1.2. Эволюция размеров ветряных турбин и перспективы на будущее.

[21].

1.2.3 Аккумуляирование энергии

Аккумуляторные батареи (далее: батареи) — это системы, которые накапливают электроэнергию в виде химической энергии. Батарея состоит из катода (положительного электрода), анода (отрицательного электрода) и электролита, который обеспечивает передачу электронов между электродами. Во время разряда электрохимические реакции на двух электродах генерируют поток электронов через внешнюю цепь, при этом катод принимает электроны, а анод обеспечивает электроны. В процессе зарядки электрохимические реакции происходят в обратном направлении, и батарея поглощает электрическую энергию из внешней цепи.

Батареи известны своим более низким энергопотреблением [22, 23]. Поэтому они используются в самых разнообразных приложениях - от электронных систем до электромобилей. Они обеспечивают высокую эффективность в маломощных системах постоянного тока. В справочнике представлены различные значения зрелости, оцениваемые от 6 до 8 по шкале уровня технологической готовности (УТГ) для различных видов батарей. Фактически, ссылка [24] указывает, что

свинцово-кислотные аккумуляторы имеют наивысшую степень зрелости, 8 баллов по шкале УТГ. Литий-ионные и NaS (натриево-серные) батареи оцениваются в 7 баллов, а батареи с окислительно-восстановительным потоком оцениваются в 6 баллов по той же шкале УТГ. Кроме того, аккумуляторы представляют собой заметную проблему с саморазрядом, что снижает их эффективность при длительной зарядке. Наконец, батареи, используемые для сетевых приложений, имеют высокую стоимость и короткий срок службы. Фактически, согласно справочнику [24], капитальные затраты на батареи, стоимость производства и срок службы могут варьироваться от 0,3 до 4 долларов США/Вт, от 0,05 до 0,45 доллара США/кВт*ч и от 3 до 15 лет соответственно, как показано в таблице 1.1.

ТАБЛИЦА 1.1: Краткое описание технологии и стоимости батарей [24].

	Свинцово-кислотный	Литий-ионный	NaS	Окислительно-восстановительный поток
Срок службы (годы)	3-10	10-15	15	5-15
Капитальные затраты (\$/Вт)	0,3-0,8	0,4-1	1-2	3-4
Себестоимость производства	0,25-0,35	0,3-0,455	0,05-0,15	0,25-0,3

Однако в последние годы технология батарей для сетевых приложений начинает появляться в реальных проектах. В справочнике [25] представлен обновленный обзор технологических разработок в области батарей для сетевых приложений. Одним из самых мощных приложений для таких батарей является усовершенствованная система хранения энергии "Умная сеть тюрьмы Санта-Рита" в Калифорнии, основанная на литий-ионной технологии, с емкостью хранения 32

МВт/0,25 ч. Что касается приложения с наибольшей емкостью хранилища, то "Сумитомо Электрик Индастриз" на Хоккайдо, Япония, основанная на технологии окислительно-восстановительного потока ванадия, обеспечивает емкость хранилища 15 МВт/60 МВт.ч. Согласно исследованию, Navigant и глобальной базе данных Министерства энергетики США [25,26], на рисунке 1.3 представлена расчетная установленная емкость аккумуляторных батарей во всем мире и оценка развития этой технологии в ближайшем будущем.

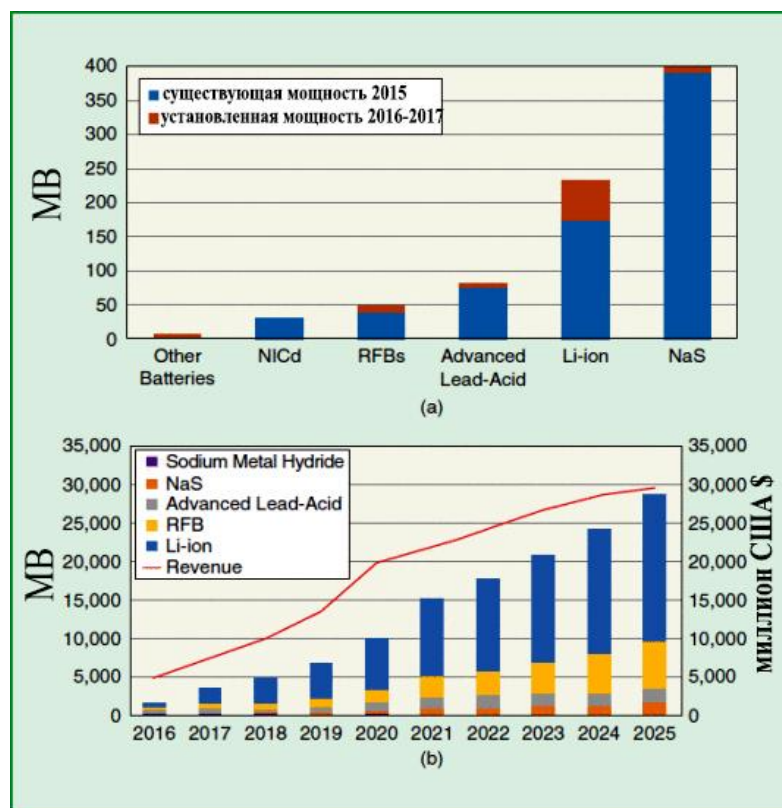


Рисунок 1.3. (а) расчетная установленная емкость батареи и (б) комиссионные (МВт) в мировой энергосистеме [27].

1.3. Описания модели гибридных системы

Гибридная энергосистема может быть описана как система производства электроэнергии, питание которой состоит из комбинации двух или более типов источников выработки электроэнергии, таких как солнечные фотоэлектрические панели, генераторы ветряных турбин, гидроэлектростанции и / или топливные

генераторы. Полезными компонентами гибридных систем, рассматриваемых в данном исследовании, являются солнечные фотоэлектрические панели и генераторы ветряных турбин. Энергия от фотоэлектрической и ветровой энергии в значительной степени зависит от наличия солнечной радиации и скорости ветра соответственно [28].

Вместо того, чтобы использовать только энергию ветра или только солнечную энергию, сочетание ветра и солнца обеспечивает лучшую и надежную систему. Оба источника вместе могут обеспечивать питание, и если происходит какое-либо снижение мощности, то другой источник может компенсировать первый. Кроме того, обе системы вместе могут обеспечивать более высокие нагрузки, если это необходимо. Всякий раз, когда генерируемая мощность становится избыточной, ее также можно хранить в аккумуляторе. Для надежного энергоснабжения отдаленных мест или труднодоступных сельских районов необходимо спроектировать и настроить гибридную систему, которая объединила бы преимущества двух различных энергетических технологий. Это могут быть либо две возобновляемые технологии, либо возобновляемая и традиционная энергия или технология ископаемого топлива. Гибридная система обеспечит поддержание оптимального уровня энергоснабжения в пасмурные дни для фотоэлектрических систем и при слабом ветре для ветровых электрогенераторов. По мнению многих экспертов по возобновляемым источникам энергии, небольшая гибридно-электрическая система, сочетающая ветровую энергетику и солнечную фотоэлектрическую технологию, предлагает несколько преимуществ по сравнению с любой отдельной системой.

Основной проблемой, с которой сталкиваются при производстве электроэнергии с использованием гибридной системы, является изменение нагрузки и возобновляемых ресурсов (солнечной радиации и скорости ветра). Поэтому основной задачей при проектировании электроэнергетической системы, использующей возобновляемые источники энергии, является точный выбор

комбинации компонентов системы, которые могут экономически удовлетворить потребность в нагрузке [29].

На основе стоимости компонентов топлива, рабочей силы, транспортировки и технического обслуживания желательно оценить наиболее рентабельный размер всех компонентов для соответствия прогнозируемым пиковым нагрузкам. В этой задаче оптимизации размер гибридной системы выполняется с целью минимизации чистых текущих затрат при одновременном надежном и экономичном удовлетворении заданного спроса. Один из способов сделать это — использовать модели компьютерного моделирования для гибридных энергетических систем [30].

В этой главе проанализированы основные компоненты гибридной системы, а именно фотоэлектрическую энергию и энергию ветра.

1.3.1. Анализ и математическое моделирование работы солнечного элемента, фотоэлектрической установки, модуля и массива

Без выбросов загрязняющих веществ или парниковых газов фотоэлектрические элементы преобразуют солнечный свет непосредственно в электричество. Солнечные панели могут преобразовывать энергию напрямую или нагревать воду с помощью индуцированной энергии. Фотоэлементы (фотоэлектрические) состоят из полупроводниковых структур, как в компьютерных технологиях. Они в основном состоят из PN-соединения. На рисунке 1.4 показан принцип генерации фототока фотоэлектрических элементов. По сути, когда солнечный свет попадает в ячейку, фотоны поглощаются атомами полупроводника, освобождая электроны от отрицательного слоя. Этот свободный электрон находит свой путь через внешнюю цепь к положительному слою, в результате чего возникает электрический ток от положительного слоя к отрицательному.

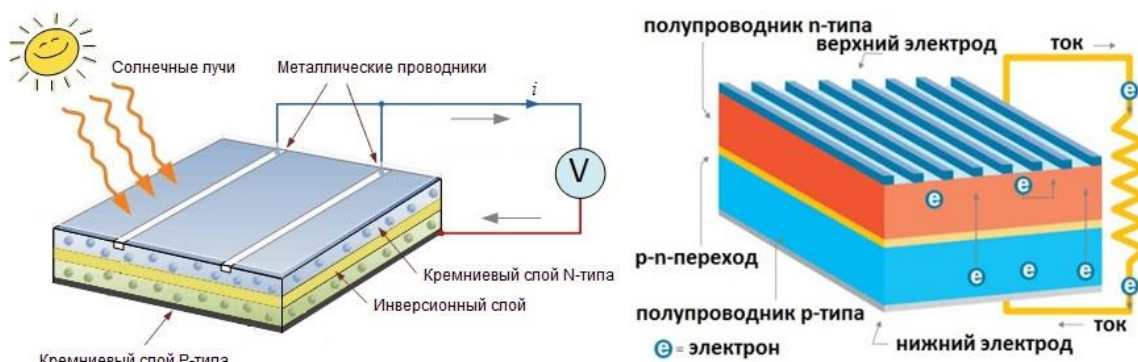


Рисунок 1.4. Солнечный элемент

Обычно фотоэлемент генерирует напряжение от 0,4 до 0,8 В в зависимости от полупроводника и технологии изготовления [31]. Это напряжение достаточно низкое, так как оно не может быть полезным. Поэтому, чтобы извлечь выгоду из этой технологии, десятки фотоэлементов соединяются последовательно, образуя фотоэлектрический модуль. Эти модули могут быть соединены последовательно или параллельно, образуя фотоэлектрическую панель, как показано на рисунке 1.5. В случае, если эти модули соединены последовательно, их напряжения добавляются с одинаковым током. С другой стороны, когда они соединены параллельно, их токи суммируются при одинаковом напряжении.

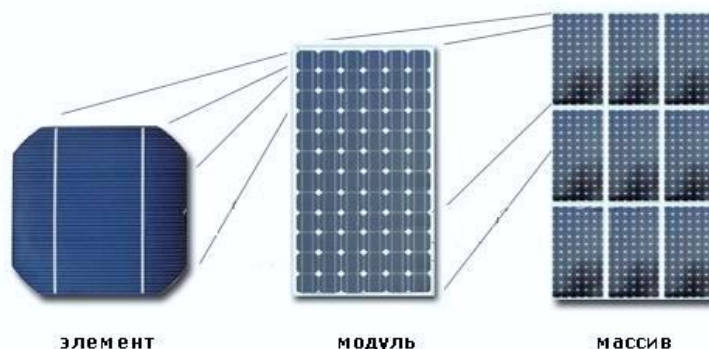


Рисунок 1.5. Строительные блоки солнечного электричества

Три основных семейства фотоэлектрических элементов включают монокристаллическую технологию, поликристаллическую технологию и тонкопленочные технологии. Монокристаллические и поликристаллические технологии основаны на технологии производства микроэлектроники, и их

эффективность обычно составляет от 10% до 15% для монокристаллических и от 9% до 12% для поликристаллических. Для тонкопленочных ячеек эффективность составляет 10% для Si, 12% для CuInSe2 и 9% для CdTe [32]. Таким образом, в этой работе была использована монокристаллическая ячейка, обладающая наибольшей эффективностью. Была проведена имитационная модель работы монокристаллического фотоэлемента в системе Matlab, которая позволила предсказать поведение фотоэлемента при различном солнечном облучении.

1.3.1.1 Математическое представление для фотоэлектрической ячейки

Энергетический выход при прямом преобразовании солнечной энергии зависит от плотности потока падающей радиации на рабочую поверхность фотоэлектрических панелей, поэтому генерация электрической энергии зависит напрямую от метода и процесса преобразования. Выходная мощность фотоэлектрического генератора является нелинейной функцией, зависящей от параметров солнечного излучения, температуры ячейки и состояния нагрузки. Для достижения фундаментального понимания работы солнечных батарей используется эквивалентная схема модели с одним диодом, представленная на рисунке 1.6, при помощи которой можно объяснить процесс преобразования солнечной энергии.

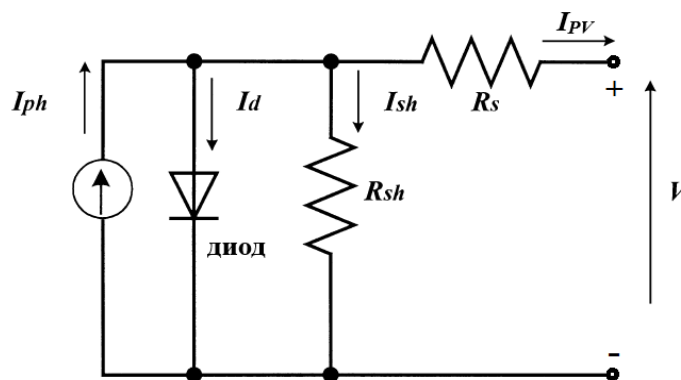


Рисунок 1.6. Модели эквивалентных схем фотоэлектрического элемента.

Выходная мощность одного диодного солнечного элемента указана.

Характеристика $I_{pv}(V_{pv})$ этой модели задается следующим уравнением [33]:

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_d - I_{Sh} \quad (1.5)$$

и развивая термины I_d и I_{Rsh} :

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_0 \left[\exp \left(q \frac{(V + I_{PV}R_s)}{A K T} \right) - 1 \right] - \frac{V + I_{PV}R_s}{R_{sh}} \quad (1.6)$$

где I_{Ph} - фототок; I_0 - ток насыщения диода; $q = 1.6 \times 10^{-19}$ С - заряд электрона; $k = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К - постоянная Больцмана; T - температура ячейки в Кельвинах; A - идеальным фактором в зависимости от фотоэлектрической технологии [34]; R_{sh} является шунтирующим сопротивлением, и R_s является последовательным сопротивлением [34]. Кроме того, ток насыщения элемента (I_0) зависит от температуры элемента и может быть описан как:

$$I_0 = I_{0\alpha} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left[\frac{q E_g}{A K \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)} \right] \quad (1.7)$$

$$I_{Rsh} = \frac{V_d}{R_{SH}} = \frac{V + I R_s}{R_{SH}} \quad (1.8)$$

$$I_{0\alpha} = \frac{I_{sc}}{\exp \left[\frac{q E_{oc}}{A K T} \right] - 1} \quad (1.9)$$

где $I_{0\alpha}$ - ток обратного насыщения элемента при солнечной радиации и эталонной температуре; I_{sc} - ток короткого замыкания элемента при температуре 25°C и 1000 Вт/м²; E_g - энергия запрещенной зоны полупроводника, используемого в элементе; и E_{oc} - напряжение разомкнутой цепи элемента. Коэффициент идеальности ячейки (A) зависит от технологии ячейки, как показано в таблице 1.2

Таблица 1.2 – Идеальный коэффициент (A) в зависимости от фотоэлектрической технологии [108]

Клеточная технология	Идеальный коэффициент (A)
Si-Поли	1.3
Si-моно	1.2
A-Si-тройной	5
a-Si:тандем	3.3
a-Si:H	1.8
CdTe	1.5
CIS	1.5
AsGa	1.3

1.3.1.2 Математическое представление для фотоэлектрического модуля

Выходная мощность солнечного элемента достигает приблизительно 2 Вт при 0,5 В. Для увеличения мощности ячейки соединены в последовательно-параллельной конфигурации на модуле. Для фотоэлектрических систем фотоэлектрическая матрица представляет собой группу из нескольких фотоэлектрических модулей, которые соединены последовательно и параллельно для генерации требуемого напряжения и тока.

Эквивалентная схема для солнечного модуля, размещенного в ветвях параллельной N_p и последовательной N_s , показана на рисунке 1.7.

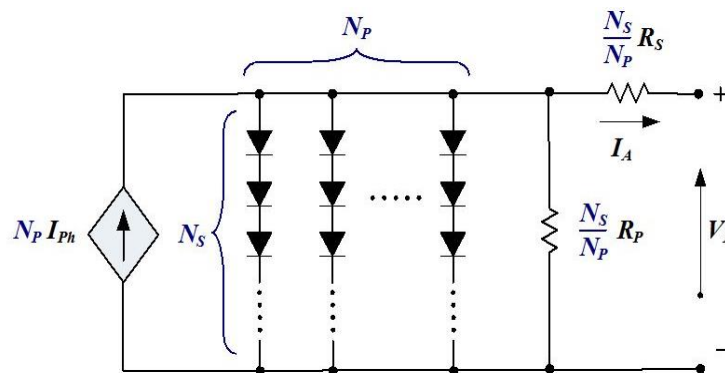


Рисунок 1.7 Эквивалентные схемные модели фотоэлектрического модуля

Терминальное уравнение для тока и напряжения модуля ячейки выглядит следующим образом [35]:

$$I_{PV} = N_P I_{Ph} - N_P I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V/N_S + IR_S)/N_P}{KT_c A} \right) - 1 \right] - \frac{(N_P V/N_S + IR_S)}{R_{Sh}} \quad (1.10)$$

где I_0 определяется уравнением (11).

$$I_0 = \frac{I_{sc,n} + K_i \Delta T}{\exp \left(q \frac{(V_{oc,n} + K_v \Delta T)}{A K N_S} \right) - 1} \quad (1.11)$$

где $I_{sc,n}$ - ток короткого замыкания в номинальном состоянии (обычно 25 оС и 1000 Вт /м²), $V_{oc,n}$ - напряжения холостого хода в номинальном состоянии, K_v - коэффициент напряжения / температуры холостого хода, K_i - коэффициент тока / температуры короткого замыкания. Коэффициент тока K_i и K_v будет влиять на ток насыщения I_0 , который сильно зависит от температуры:

$\Delta T = T - T_n$, где T и T_n - фактические и номинальные температуры [К], G - солнечное излучение в кВт/м², а N_S - количество последовательных ячеек, N_P - это количество параллельных ячеек. Ток I_{Ph} , генерируемый светом, определяется уравнением (12) Значения R_S и R_P можно найти, если $P_{max,m} = P_{max,e}$, из уравнений (13) и (14):

$$I_{Ph} = [I_{SC} + K(T_c - T_{ref})] \frac{G}{G_n} \quad (1.12)$$

где G_n - номинальная освещенность [Вт/м²].

$$P_{max,m} = V_{mp} \left\{ I_{PV} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q}{K T} \frac{V_{mP} + R_S I_{mP}}{a N_S} \right) - 1 \right] - \frac{V_{mP} + R_S I_{mP}}{R_p} \right\} P_{max,e} \quad (1.13)$$

$$R_p = \frac{V_{mp} (V_{mp} + I_{mp} R_S)}{V_{mp} I_{PV} - V_{mp} I_0 \exp \left[\left(\frac{q}{K T} \frac{V_{mP} + R_S I_{mP}}{a N_S} \right) \right] + V_{mp} I_0 P_{max,e}} \quad (1.14)$$

Уравнение (1.13) и уравнение (1.14) показывают, что для каждого значения R_S существует только одно значение R_P . Чтобы получить это значение, необходимо сделать итерацию процесса до тех пор, пока $P_{max,m}$ не станет равным $P_{max,e}$.

1.3.2. Анализ и математическое моделирование работы ротора ветроэнергетической установки и их характеристик

Из всех видов возобновляемой энергии энергия ветра признана основным источником в электроэнергетике. Ресурсы энергии ветра огромны во всем мире. Система преобразования энергии ветра является одним из наиболее универсальных нетрадиционных источников энергии из-за постоянно растущего спроса на электроэнергию. Поскольку ветер является естественным источником, а его полезность основана на климатических изменениях, важно эффективно использовать эту энергию для удовлетворения спроса [36].

Энергия ветра является одним из самых быстрорастущих источников электроэнергии и одним из самых быстрорастущих рынков в современном мире. На рисунке 1.8 показана диаграмма роста ветроэнергетики в мире, в частности, в 2021 году. Ветровые турбины используются для преобразования энергии ветра в электроэнергию. Электрогенератор внутри турбины преобразует механическую энергию в электрическую. Системы ветровых турбин доступны в диапазоне от 50 Вт до 3-5 МВт. Производство энергии ветряными турбинами зависит от скорости ветра, действующего на турбину [37]. В рисунке 1.9 показаны основные части ветряной турбины.



Рисунок 1.8. Установленная мощность ветроэнергетики в мире до 2021 г, (эксплуатационная) [37]

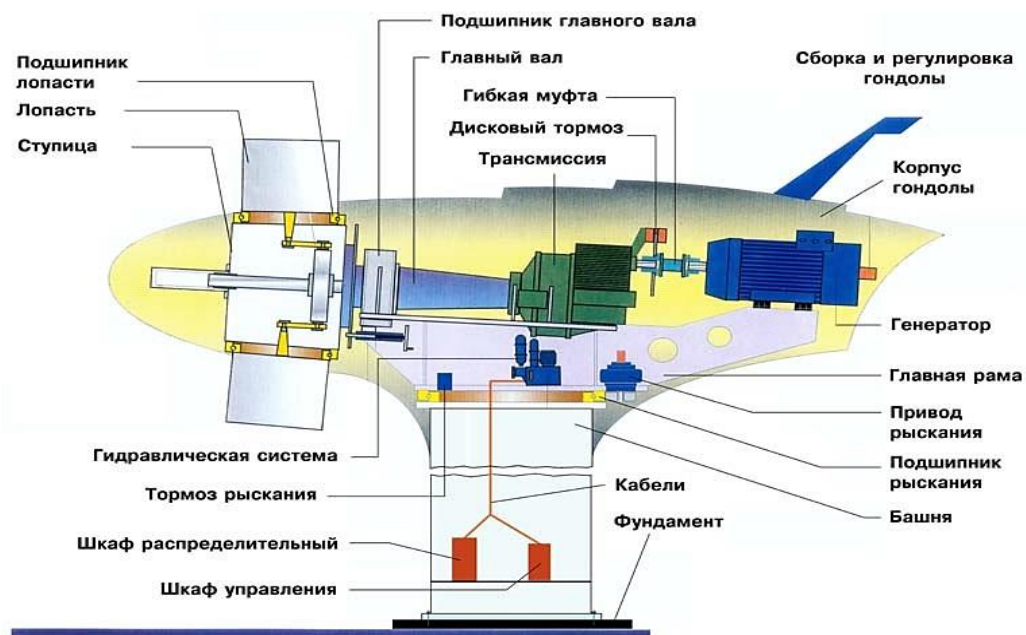


Рисунок 1.9. Схема ветроэлектрической установки

Системы ветряных турбин можно разделить на две основные группы в зависимости от ориентации вала. Эти группы могут быть дополнительно подразделены на основе конфигурации лопастей ротора или количества лопастей и способа подключения турбинной системы к сети. Две основные группы турбин состоят из турбин с горизонтальным расположением вала и турбин с вертикальным расположением вала.

Как следует из названий, в случае конфигурации с горизонтальным валом вал находится в горизонтальном положении с лопастями, соединенными с одним концом вала, как показано на рисунке 1.10 (а). Ветряная турбина с вертикальным валом имеет гораздо более длинный вал в вертикальном положении с лопастями, соединенными с валом более чем в одной точке, как показано на рисунке 1.10 (b). Турбины с вертикальной конфигурацией вала дополнительно подразделяются на группы в зависимости от расположения и формы лопастей. Наиболее известной ветряной турбиной с вертикальным валом является ϕ -конфигурация Darrieus, также известная как конфигурация eggbeater. Другими хорошо известными группами являются типы Масгроув, Даймонд, Савониус, Джиромилл и Φ [38, 39].

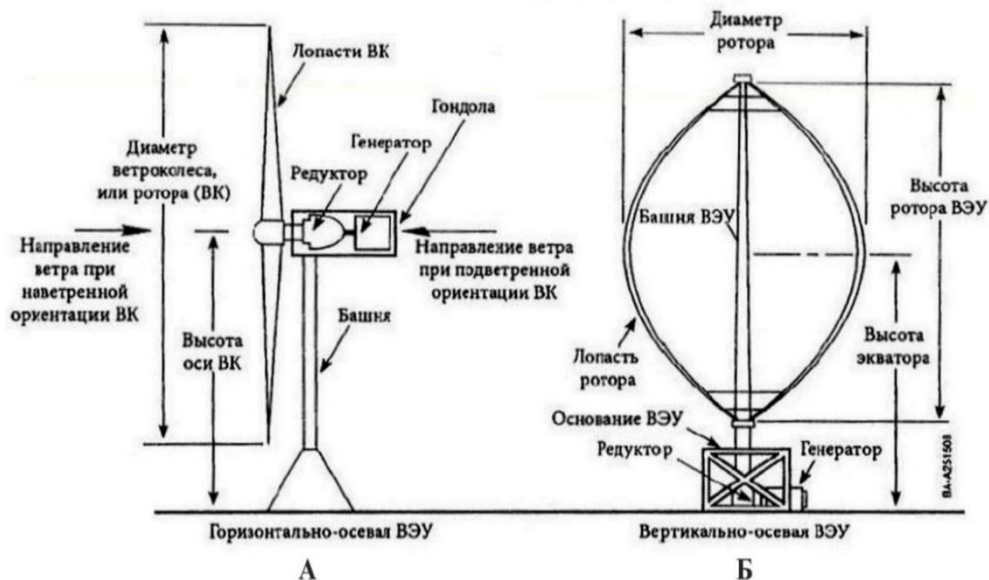


Рисунок 1.10. Вертикальные и горизонтальные ветровые турбины

Самым большим преимуществом ветряной турбины с вертикальным валом является тот факт, что она является всенаправленной, поэтому энергия может генерироваться ветром дующим, с любой стороны, без необходимости внесения каких-либо изменений в ветряную турбину. Такая конфигурация устраняет необходимость в рыскающих передачах. Еще одним преимуществом является то, что генератор и редуктор могут быть размещены на уровне земли, что обеспечивает простую и дешевую конструкцию, а большая часть технического обслуживания ветряной турбины может выполняться на уровне земли.

Основным недостатком ветряной турбины с вертикальным валом является то, что эти турбины в большинстве случаев не самозапускаются, для запуска ветряка требуются дополнительные механизмы. Ветровые турбины с вертикальным валом также известны своей более низкой эффективностью из-за наличия аэродинамические мертвых зон, через которые лопасти должны пройти, чтобы завершить свое вращение [40].

В большинстве современных ветряных турбин используется конфигурация с горизонтальным валом. Этот тип конфигурации турбины может быть

дополнительно разделен на подкатегории, если посмотреть на количество лопаток турбины, которые включают в себя конфигурации с одной, двумя, тремя и несколькими лопатками. Преимущества использования только одной лопасти - минимальные потери на лобовое сопротивление и высокая идеальная рабочая скорость. Высокая рабочая скорость приводит к более дешевой коробке передач с низким передаточным числом. К недостаткам, связанным с высокой рабочей скоростью, относятся больший износ системы и высокий уровень шума. Еще один недостаток заключается в том, что лезвие необходимо уравновесить противовесом. Этот вес не влияет на извлекаемую энергию, но увеличивает потери на лобовое сопротивление [41].

Как и в случае с однолопастной турбиной, у двухлопастных турбин идеальная рабочая скорость высока и, следовательно, все еще довольно шумна. Самым большим недостатком турбин с четным числом лопастей является то, что самая верхняя лопасть получает максимальную мощность от ветра в то время, когда самая нижняя лопасть получает минимальную мощность от ветра из-за влияния башни. Это приводит к проблемам с устойчивостью в машине или коробке передач с жесткой конструкцией. Следовательно, турбины с четным числом лопастей используются не так часто [42]. Трехлопастная турбина также известна как классическая датская концепция. Эта турбина обеспечивает большую динамическую стабильность, чем одно- или двухлопастные турбины, поскольку они имеют оптически более плавную работу, следовательно, визуально лучше интегрируются в ландшафт. У всех крупных производителей имеются модели трехлопастных турбин мощностью от десятков киловатт до 6 МВт [43,44]. После многих лет исследований, проведенных всеми основными производителями турбин, кажется, что большинство из них выбрало конфигурацию горизонтального вала с тремя лопастями, расположенными против ветра.

1.3.2.1 Математическое моделирование работы ВЭУ

Лопасты ветряной турбины извлекают поток энергии из движущегося воздуха, который затем преобразует эту энергию в энергию вращения и подает ее через механический привод к ротору электрогенератора. Кинетическая энергия в воздухе объекта массы m , движущегося со скоростью v , равна [45]:

$$E = 0,5 m v^2 \quad (\text{нм}) \quad (1.15)$$

Сила в движущемся воздухе, если используем постоянную скорость ветра, равна [46]:

$$P_{\text{ветер}} = \frac{dE}{dt} = 0,5 m' v^2 \quad (1.16)$$

где m' - массовый расход в секунду, $P_{\text{ветер}}$ — выходная мощность в (Вт), v — скорость ветра (м/с)

Также было установлено, что

$$m' = \rho A_C \frac{dx}{dt} \quad (1.17)$$

Где ρ - плотность воздуха в (кг/м³), A_C также площадь захвата лопастей (м²), а dx/dt - скорость изменения расстояния в секунду [47].

$$\frac{dx}{dt} = v \quad (1.18)$$

из уравнений (1.17) и (1.18) мы получаем уравнение (1.19)

$$m' = \rho A_C v \quad (1.19)$$

Когда воздух проходит через область A , такую как область, охватываемая лопастями несущего винта, мощность в воздухе может быть оценена уравнением (21), которое вытекает из уравнений (16) и (19):

$$P_{\text{ветер}} = 0,5 \rho A_C v^3 \quad (1.20)$$

из уравнения 20 следует, что увеличение мощности, доступной от ветра, происходит за счет увеличения плотности воздуха (ρ), площади охвата (A_C) и скорости ветра (v), и обратное является правильным

Плотность воздуха зависит от давления и температуры воздуха. Приведенное выше уравнение оценивает, какая мощность содержится в ветре, но какая часть этой мощности может быть извлечена из воздушного потока с помощью преобразователя энергии. Как показано в [48], механическая энергия, которую преобразователь извлекает из воздушного потока, будет равна разности мощностей воздушного потока до и после преобразователя:

$$P_{\text{механ.}} = \frac{1}{2} \rho A_{C1} v_1^3 - \frac{1}{2} \rho A_{C2} v_2^3 = \frac{1}{2} \rho (A_{C1} v_1^3 - A_{C2} v_2^3) \quad (\text{Вт}) \quad (1.21)$$

где $P_{\text{механ.}}$ это механическая мощность, A_{C1} и A_{C2} — площади поперечного сечения до и после преобразователя, а v_1 и v_2 — скорость ветра до и после преобразователя. При прохождении воздушного потока через преобразователь скорость ветра за преобразователем энергии ветра должна уменьшаться, а массовый расход остается неизменным [49], следовательно:

$$\rho A_{C1} v_1 = \rho A_{C2} v_2 \quad \left(\frac{\text{Kg}}{\text{с}}\right) \quad (1.22)$$

таким образом

$$P_{\text{механ.}} = \frac{1}{2} \rho A_{C1} v_1 (v_1^2 - v_2^2) \quad (\text{Вт}) \quad (1.23)$$

Из уравнения (1.23) видно, что максимальная механическая мощность возникает, когда v_2 равно нулю. Если бы v_2 было равно нулю, воздух был полностью остановлен преобразователем, что физически невозможно. Если скорость истечения за преобразователем равна нулю, то скорость втекания должна быть равна нулю, что означает отсутствие потока через преобразователь. Следовательно, механическая мощность, извлекаемая из воздушного потока, должна быть выражена другим уравнением. По закону сохранения импульса сила, действующая на преобразователь со стороны ветра, равна [49]:

$$F = m' (v_1 - v_2) \quad (\text{Н}) \quad (1.24)$$

и извлеченная механическая мощность составляет:

$$P_{\text{механ.}} = F \dot{v} = m'(v_1 - v_2)\dot{v} \quad (1.25)$$

Сравнивая уравнения 22 и 26, можно получить соотношение для скорости потока \dot{v} :

$$\dot{v} = \frac{1}{2} (v_1 - v_2) \quad (\text{м/с}) \quad (1.26)$$

Таким образом, скорость воздушного потока через преобразователь равна среднему значению v_1 и v_2 .

Тогда механическая выходная мощность преобразователя может быть выражена как:

$$P_{\text{механ.}} = \frac{1}{4} \rho A_C v_1 (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2) \quad (\text{Вт}) \quad (1.27)$$

Поскольку мощность ветра пропорциональна как плотности воздуха, так и кубу скорости ветра, была использована виртуальная температура (T_v в К) и поверхностное давление (p в Па), чтобы получить плотность ρ воздуха в (кг/м^3) [50].

$$\rho = \frac{P}{R T_v} \quad (1.28)$$

где $R = 287,058$ Дж/кг·К - газовая постоянная, соответствующая сухому воздуху. Вычисленная плотность воздуха является точной с помощью виртуальной температуры.

Площадь стреловидности турбины можно рассчитать по длине лопастей турбины, используя уравнение для площади окружности:

$$A_C = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (1.29)$$

где D - диаметр ротора в метрах.

1.3.2.2 Характеристики мощности ротора ВЭУ

Предел Бетца — это теоретическая максимальная эффективность ветряной турбины, предположенный немецким физиком Альбертом Бетцем в 1920 году [51]. Бетц пришел к выводу, что это значение составляет 59,3%, а это означает, что не более 59,3% кинетической энергии ветра можно использовать для вращения турбины и выработки электроэнергии. В действительности турбины не могут достичь предела Бетца, а общий КПД находится в диапазоне 35-45%. Соотношение между механической мощностью, извлекаемой преобразователем, и мощностью, содержащейся в воздушном потоке, проходящем через ту же область, называется “коэффициентом мощности” c_p , следует отметить, что это значение коэффициента мощности было получено для идеального преобразователя потока без трения. В реальных случаях ветродвигатель всегда будет иметь меньший коэффициент максимальной мощности, чем коэффициент Бетца. Это связано со многими аэродинамическими потерями, которые зависят от конструкции и конструкции несущего винта (количество лопастей, вес, жесткость и т. д.). Коэффициент мощности и КПД ветряной турбины различны. КПД ветряной турбины включает потери в механической передаче, выработке электроэнергии, потери преобразователя и т. д., где в качестве коэффициента мощности используется эффективность преобразования мощности ветра в механическую энергию на валу ротора. На рисунке 1.12 показана диаграмма с потерями ветротурбинной системы [52].

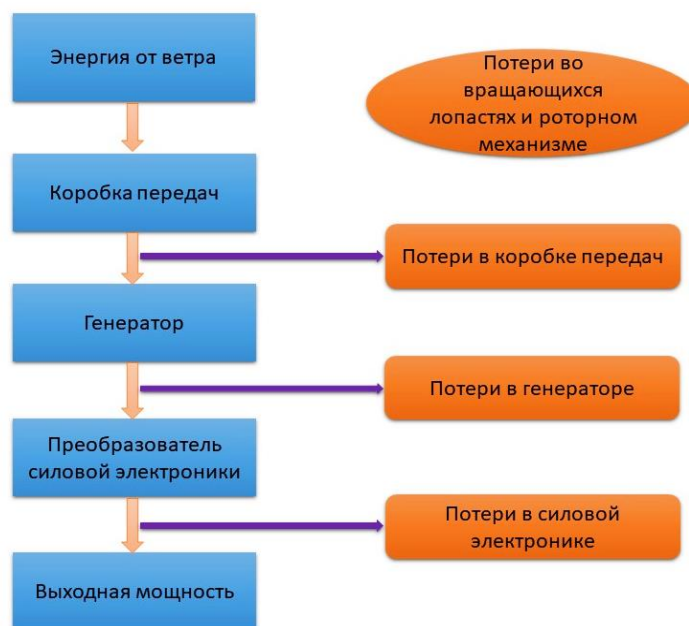


Рисунок 1.12. Поток мощности и потери ветряных турбин

Используя коэффициент мощности, механическую мощность на роторе можно рассчитать, как функцию скорости ветра:

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \rho A_c v^3 \quad (1.30)$$

где:

C_p - коэффициент мощности ротора

P_m - механическая мощность на роторе (Вт).

ρ - плотность воздуха (кг/м³)

v - скорость ветра (м/с)

A_c - площадь стреловидности ротора (м²)

Коэффициент мощности можно получить по полям данных или таблицам блокировки или путем аппроксимации коэффициента с помощью аналитической функции. В этой диссертации для моделирования ветровой турбины использовалась следующая аналитическая функция коэффициента мощности, как показано в [53]:

$$C_p(\gamma, \beta) = C_1 \left(C_2 \frac{1}{\gamma} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{-C_5 \frac{1}{\gamma}} + C_6 \gamma \quad (\text{Вт}) \quad (1.31)$$

Коэффициенты $C_1 - C_6$ могут быть разными для различных турбин. Они зависят от конструкции ротора и лопасти ветротурбины. γ - коэффициент быстроходности (TSP).

На рисунке 1.13 показана зависимость механической мощности от частоты вращения ротора генератора для конструкции ветротурбины, показанной выше. Важно сказать, что каждая конструкция ветряной турбины будет иметь разный график зависимости мощности от частоты вращения ротора.

Кроме того, коэффициент мощности каждой турбины будет определяться конструкцией ее лопасти и углом наклона (см. рисунке 1.14).

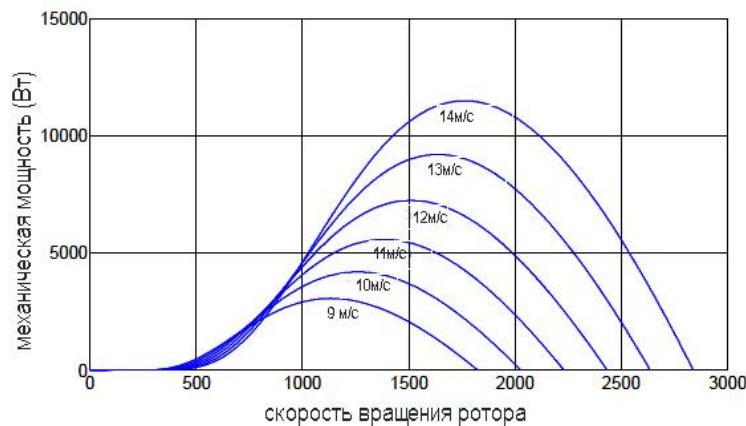


Рисунок 1.13. Типичные характеристики зависимости мощности от скорости ветряной турбины.

Коэффициент эффективности изменяется при разных отрицательных значениях угла ориентации (0, 5, 10, ...), но наилучшая эффективность достигается при $\beta = 0^\circ$ (предполагается, что это оптимальный угол установки лопасти при данной скорости ветра).

Из рисунка 1.14 видно, что оптимальное соотношение скорости конца лопасти составляет $\gamma = 8,1$ и максимальный коэффициент использования мощности $C_{p \max.} = 0,48$.

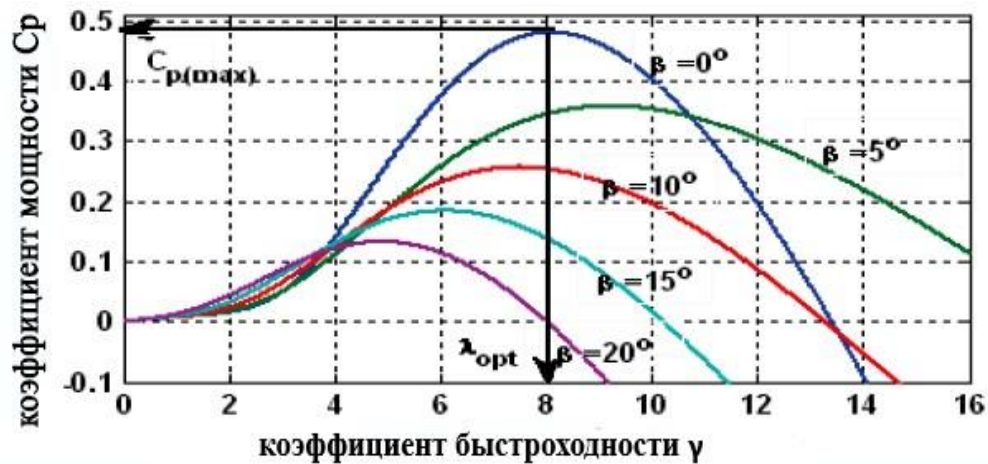


Рисунок 1.14. Зависимость коэффициента использования мощности от соотношения скоростей ветра и линейной скорости конца лопасти (коэффициента быстроходности γ)

Очень важно изучить характеристики крутящего момента и скорости вращения ветряной турбины. Знание характеристик крутящего момента и скорости ветряных турбин позволит им правильно соответствовать нагрузке и работать с генератором в его стабильной области. Типичная характеристика крутящего момента и скорости для современной ветряной турбины приведена на рисунке 1.15. Профиль кривой, крутящий момент-скорость получается из следующего соотношения:

$$T_{\text{механ.}} = \frac{P_M}{\omega_r} \quad (1.32)$$

где $T_{\text{механ.}}$ — механический крутящий момент в роторе, а P_M и ω_r — механическая мощность и угловая скорость ротора соответственно. Как видно из рисунков 1.13 и 1.15, точка максимальной мощности не совпадает с точкой максимального крутящего момента.

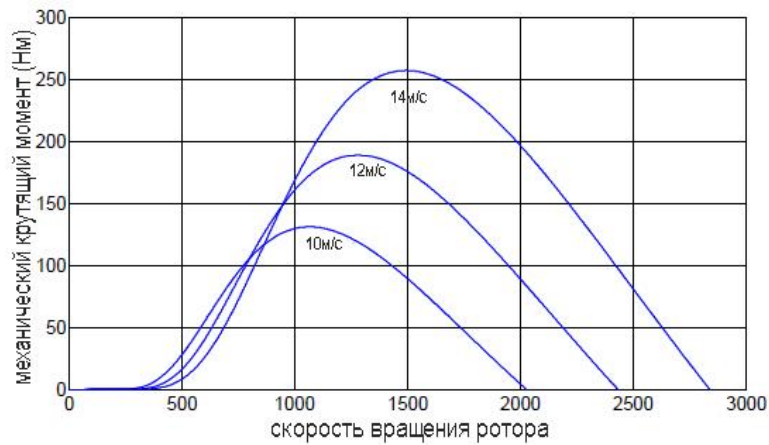


Рисунок 1.15. Характеристики крутящего момента и скорости современной ветряной турбины для различных скоростей ветра.

Выходная мощность является произведением крутящего момента и скорости, поэтому при правильном управлении генератором характеристики нагрузки могут быть согласованы, обеспечивая максимальную мощность при всех скоростях ветра. Чтобы управлять ветровой турбиной для получения максимальной мощности при различных скоростях ветра, необходимо использовать силовые электронные схемы.

1.3.3. Анализ и математическое моделирование работы аккумуляторных батарей

Батарея представляет собой механическое устройство, которое преобразует электрическую энергию в химическую энергию и высвобождает эту энергию в результате химической реакции, когда это необходимо. В приложениях для хранения энергии в сети перезаряжаемые батареи используются для выравнивания нагрузки путем зарядки батарей в периоды низкого спроса и возврата энергии в сеть в периоды высокого спроса на электроэнергию, что помогает устранить потребность в дорогих пиковых электростанциях и амортизировать стоимость генераторов. более часов работы [56]. Поскольку на характеристики батареи (химическая реакция) серьезное влияние оказывает внутренняя и внешняя среда,

необходимо установить точные модели батарей, которые могут способствовать более эффективному использованию батарей. Исследователи по всему миру разработали самые разнообразные модели аккумуляторов разной степени сложности.

Самая эффективная аккумуляторная система: литий-ионная, используется там, где первостепенное значение имеют высокая плотность энергии и малый вес. Технология хрупкая, и для обеспечения безопасности требуется схема защиты. Приложения включают ноутбуки и сотовые телефоны. Литий-ионный аккумулятор — это аккумулятор с низкими эксплуатационными расходами, преимущество, на которое не может претендовать большинство других химических производств. Памяти нет, и для продления срока службы батареи не требуется циклирование по расписанию. Кроме того, саморазряд составляет менее половины по сравнению с NiCd, что делает литий-ионный аккумулятор хорошо подходящим для современных применений с датчиками расхода топлива. Литий-ионные элементы при утилизации наносят небольшой вред, поэтому буду использовать их в этом исследовании [57].

1.3.3.1 Механизм работы литий-ионного аккумулятора

Литий-ионная батарея представляет собой тип перезаряжаемой батареи, состоящей из катода из соединения лития, графитового (обычно) анода и электролита (сепаратора), как показано на рисунке 1.17. Ионы лития движутся от катода к аноду при заряде и в обратном направлении при разряде.

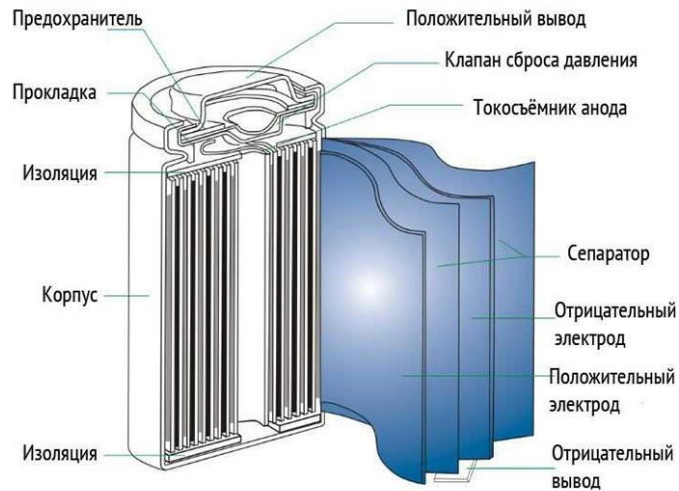


Рисунок 1.17. Цилиндрическая литий-ионная батарея [58]

Рисунок 1.18 поясняет демонстрацию внутренних реакций и изменений тока во время заряда и разряда аккумулятора. При заряде соединения лития распадаются на ионы лития, электроны и другие соединения лития. Электроны идут от катода к аноду по внешним проводникам, ионы лития переходят от катода к аноду через электролит, а ток идет от анода к катоду. Графит используется в большинстве литий-ионных аккумуляторов в качестве анода, потому что он имеет интернализированную структуру для удержания ионов лития и увеличения емкости аккумулятора. Ионы лития и электроны реагируют с углеродом на аноде и образуют соединение углерода с литием [59].

Поскольку ионы лития текут при довольно высоком напряжении, каждая ячейка генерирует 3,6 вольта. Это значительно выше, чем 1,5 вольта в обычном элементе, что позволяет литий-ионным батареям быть более компактными в небольших устройствах, таких как смартфоны [60].

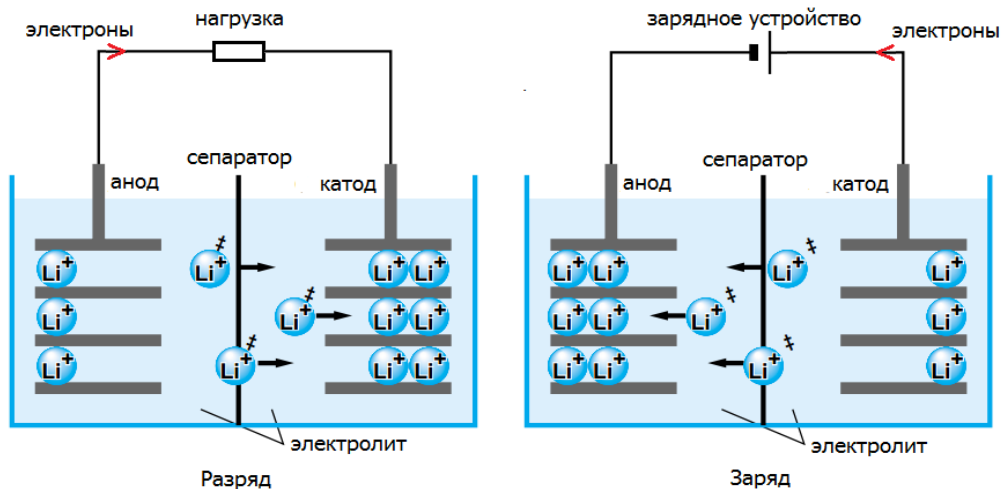


Рисунок 1.18. Цилиндрическая литий-ионная батарея [61]

1.3.3.2 Математическое моделирование работы АКБ

Простая модель состоит из идеального источника напряжения со значением E_b (равным напряжению разомкнутой цепи) и внутреннего последовательного сопротивления $R_{бат.}$. Где $V_{бат.}$ - напряжение на клеммах аккумулятора, как показано на рисунке 1.19.

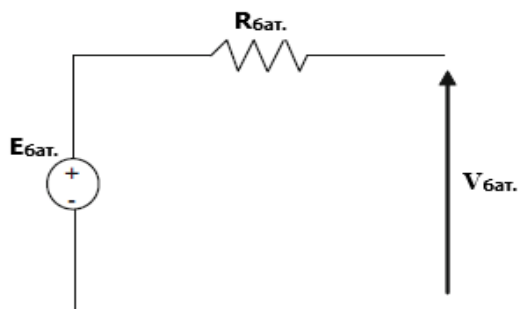


Рисунок 1.19. Принципиальная схема эквивалентной модели батареи.

Ток в батарее возникает в результате переноса электронов с одного электрода на другой. В результате напряжение при протекании тока отличается от напряжения холостого хода, и разница состоит из (1) перенапряжения на электродах, вызванного электрохимическими реакциями и отклонениями концентрации из-за явлений переноса, и (2) омических падений напряжения, вызванных электронным,

а также ионный ток протекает в проводящих частях, включая электролит. Сумма обоих, называемая поляризацией, отвечает за снижение напряжения на элементе ($V_{\text{разр.}}$) во время разряда и увеличение напряжения на элементе ($V_{\text{зар.}}$) при заряде, как показано ниже [62].

$$V_{\text{разр.}} = E_{\text{бат.о}} - V_{\text{ор+}} - V_{\text{ор-}} - I R_{\text{пол}} \quad (1.33)$$

$$V_{\text{зар.}} = E_{\text{бат.о}} + V_{\text{ор+}} + V_{\text{ор-}} + I R_{\text{пол}} \quad (1.34)$$

где $R_{\text{пол}}$ означает поляризационное сопротивление, а $V_{\text{ор+}}$ и $V_{\text{ор-}}$ - перенапряжения на положительном и отрицательном электродах соответственно. Из-за эффектов поляризации напряжение батареи при протекании тока может существенно отличаться от напряжения разомкнутой цепи в зависимости от состояния заряда батареи. Эти условия являются важными компонентами для разработки модели аккумулятора.

Наиболее известной вольтамперной моделью для разряда постоянного тока является модель Шеперда [63]:

$$V_{\text{бат.}} = E_{\text{бат.о}} - K \left[\frac{Q}{Q - I_T} \right] I - I R_{\text{бат.о}} \quad (1.35)$$

$$SOC = \left[\frac{Q - I_T}{Q} \right] \quad (1.36)$$

где первый член $E_{\text{бат.о}}$ представляет напряжение разомкнутой цепи батареи при полной емкости, Q - емкость батареи (Ач), K - коэффициент поляризационного сопротивления (Ом), I - ток батареи (А), $R_{\text{бат.о}}$ - внутреннее сопротивление. В (1.39) второй член связан с потерей поляризационного омического напряжения, а последний член обозначает потерю внутреннего сопротивления. Путем подстановки уравнения (1.36) в уравнение (1.35) получается уравнение (1.37), используя состояние заряда (SOC), которое указывает, что омическое напряжение поляризации обратно пропорционально SOC [64].

$$V_{\text{бат.}} = E_{\text{бат.о}} - \frac{K}{SOC} I - I R_{\text{бат.о}} \quad (1.37)$$

Соотношение Шепарда менее сложное, чем в некоторых современных моделях напряжение-ток [65]. Часто эти модели начинаются с отношений, подобных отношениям Шеперда, а затем развиваются путем добавления или изменения таких терминов, как:

- 1) ослабить предположения модели Шеперда.
- 2) улучшить соответствие отношения как наблюдаемым зарядным, так и разрядным кривым.

Модифицированные модели аккумуляторов объясняются уравнениями (1.38 и 1.39), которые описывают процессы заряда и разряда аккумуляторов, соответственно, на основе модели аккумулятора в Matlab [66,67],

$$V_{\text{разр.}} = E_{\text{бат.о}} - K \left[\frac{Q}{Q - I_T} \right] I^* - I R_{\text{бат.о}} - K \left[\frac{Q}{Q - I_T} \right] I_T + \exp(t) \quad (1.38)$$

$$V_{\text{зар.}} = E_{\text{бат.о}} - K \left[\frac{Q}{\lambda Q + I_T} \right] I^* - I R_{\text{бат.о}} - K \left[\frac{Q}{Q - I_T} \right] I_T + \text{эксп.}(t) \quad (1.39)$$

В (1.38) и (1.39) коэффициент λ предназначен для расчета сдвига поляризационного сопротивления во время заряда батареи [68]. Следующий член, относящийся к поляризационному омическому падению напряжения, различен для заряда и разряда и изменяется на использование отфильтрованного тока батареи I^* для имитации фактического медленного динамического поведения напряжения для реакции на ступенчатый ток. Внутреннее сопротивление в третьем члене имеет разные значения для заряда и разряда. можно использовать кривую разряда от производителя батареи [69].

Последний член $\text{эксп.}(t)$ представляет собой экспоненциальное динамическое напряжение, отражающее явление нелинейного гистерезиса между разрядом и зарядом. Идеализированная кривая разряда показана на рисунке 1.20. Три точки разряда, показанные на рисунке 1.20, можно использовать для определения постоянных параметров K , $R_{\text{бат.о}}$ и $E_{\text{бат.о}}$ в (1), чтобы отразить явление нелинейного гистерезиса между разрядом и зарядом.

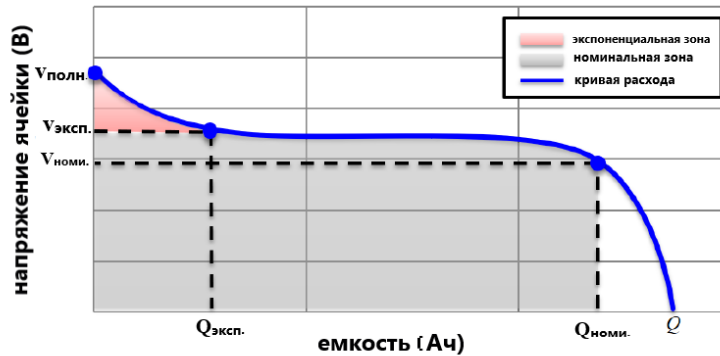


Рисунок 1.20. Пример идеализированной кривой разряда батареи [69].

1.3.3.3 Эффективность работы аккумулятора и влияние температуры

Различают два типа эффективности нагрузки: энергетическая эффективность общая и фарадическая эффективность (кулоновская). Проблема заключается в способности батареи накапливать электрический заряд; это не связано с джоулевыми потерями во внутреннем сопротивлении. Энергоэффективность учитывает кулоновский КПД и потери за счет эффекта Джоуля [70].

$$\eta = 1 - \exp \left[\frac{20,73}{\frac{I_{\text{бат.}}}{I_{10}} + 0,5} (\text{SOC} - 1) \right] \quad (1.40)$$

где η - КПД, I_{10} - 10-часовой ток,

1.4 Оптимизации гибридных систем энергоснабжения

Поскольку энергосистема должна быть устойчивой и экологически безопасной, основная функция гибридной системы возобновляемой энергии заключается в надежном и экономичном снабжении качественной электрической энергией [71]. Таким образом, оптимизация играет важную роль. Это позволяет свести к минимуму эксплуатационные расходы, первоначальные инвестиции и воздействие на окружающую среду, а также повысить надежность, качество и эффективность. Оптимизация гибридной системы возобновляемой энергии, используемая для анализа системы, в основном сосредоточена на двух проблемах: (А) стратегии проектирования для оптимальной диспетчеризации, которые зависят

от ограничений системы, удовлетворяющих требованиям нагрузки при минимальных затратах, и (Б) определение оптимальной конфигурации энергосистемы и оптимальный тип и размер установленных генерирующих блоков [72].

Чтобы получить подходящую гибридную систему возобновляемой энергии, система должна быть спроектирована в соответствии с техническими, экономическими и экологическими мерами, чтобы соответствовать физическим и эксплуатационным ограничениям. Чтобы оптимизировать затраты, при проектировании системы ищутся конфигурации и стратегии управления, обеспечивающие наименьшие общие затраты в течение всего срока службы системы. Затраты на срок службы системы обычно состоят из двух или более компонентов. Стоимость системы – это сумма всех ее компонентов, например, фотоэлектрических, ветряных, аккумуляторных, трансформаторных и любых других необходимых устройств, а также стоимость монтажа [73].

Программное обеспечение для моделирования следует использовать для проверки производительности различных возможных конфигураций, чтобы достичь оптимальной комбинации. Количество симуляций и время, необходимое для вычислений, увеличивается с увеличением количества переменных оптимизации. Поэтому выбор точного и быстрого метода оптимизации очень важен [74].

Выводы по главе 1

Технология кристаллических ячеек является наиболее широко используемой, потому что она наиболее чувствительна к тепловым изменениям, чем другие используемые технологии.

Солнечные элементы обычно изготавливаются из:

- Кристаллического кремния;

- Тонких пленок;
- Других технологий, такие как CPV, OPV и DSSC.

В дневное время фотоэлектрическая система естественным образом демонстрирует нелинейные выходные характеристики (I-V и P-V), которые изменяются в зависимости от температуры ячеек и солнечного излучения. В ночное время ячейка будет работать как диод, потому что она будет неактивна.

Количество энергии, вырабатываемой солнечными элементами, напрямую зависит от количества падающего на элементы излучения (от плотности световой энергии), энергия поступает в виде прямых или рассеянных солнечных лучей. На производительность фотоэлектрических панелей также влияют другие факторы, такие как азимут коллектора, затенение и угол наклона фотоэлектрических панелей. Солнечные батареи в настоящее время используются в производстве солнечной энергии, и при установке фотоэлектрических панелей учитываются различные факторы, наиболее важным из которых является наличие и направление солнечного света на приемную поверхность.

В разделе обсуждаются ветровые турбины и их динамическое поведение, анализируется электрическая схема, рабочая модель и факторы, влияющие на их выработку, такие как скорость вращения и угол наклона лопасти.

Безопасно и эффективно ветровые турбины преобразуют кинетическую энергию в электрическую, что означает преобразование ветра в чистую электрическую энергию. Ветровые турбины могут вращаться вокруг вертикальной или горизонтальной оси, ветровые турбины генерируют различную энергию в зависимости от размера самой турбины и высоты башни. В этом исследовании были выбраны небольшие турбины, потому что они используются для выработки энергии в отдаленных районах, домах и фермах, которые обычно потребляют менее 50 кВт. Кроме того, были проведены лабораторные эксперименты на ветродвигателе, установленном в лабораториях Севастопольского государственного университета.

В нем работает генератор на постоянных магнитах и выходом постоянного тока. Существуют и другие типы генераторов ветровых турбин, работающих на двигателях переменного тока и с выходным током переменного тока.

Мощность, производимая ветровой турбиной, напрямую зависит от генераторов этих турбин и скоростей ветра. Существует предел, называемый пределом Питера, который достигает (максимум 59%), и является максимальным достижением, при котором ветровые турбины могут производить энергию. Другими словами, ветровые турбины производят энергию, которая ограничена скоростью ветра, которая не превышающая выходную мощность предела Питера. Из соображений безопасности должна быть предусмотрена система узлов для ограничения мощности генератора до её номинального значения при высоких скоростях ветра (см. следующую главу).

На выработку энергии солнечного ветра влияют климатические условия, такие как солнечное излучение или скорость ветра, поэтому необходимо использовать энергетическую систему, поддерживающую подачу энергии в любых условиях. Например, аккумуляторные батареи, которые в некоторых случаях используются для восполнения дефицита. Аккумулятор представляет собой высокоэффективную энергетическую систему и обеспечивает быстрый запуск. В этой главе был проведен анализ различных типов аккумуляторов, и было отмечено, что литий-ионные аккумуляторы являются лучшими аккумуляторами для использования в предлагаемой системе, благодаря их высокой долговечности, хорошей надежности. При этом они также не требуют специального технического обслуживания, обладают высокой эффективностью.

Также была проанализирована математическая модель эквивалентной электрической схемы литий-ионного аккумулятора, его химическая конфигурация и изучено влияние температуры на работу аккумулятора в случае зарядки и разрядки. В следующей главе будет рассмотрено проектирование и внедрение предлагаемой гибридной энергетической системы с использованием Matlab.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ КОМПОНЕНТОВ ГИБРИДНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ

2.1 Математическое моделирование работы солнечной установки

Солнечная батарея является строительным блоком солнечной энергетической системы. Чтобы понять принципы её работы, использовали известную эквивалентную схему солнечного элемента. Это называется моделью с одним диодом. Схема модели солнечного элемента показана на рисунке 1.6. Модель состоит из фототока, диода, последовательного резистора (R_S), описывающего внутреннее сопротивление протекания тока, и параллельного резистора (R_{Sh}), выражающего ток утечки. Математическая модель терминального тока (I) (см. раздел 1.3.). На рисунке 2.1 и 2.3 показана реализация блок-схемы модели проектирования и подсистемы для реализации обобщенной фотоэлектрической модели соответственно. Для проверки нелинейных выходных характеристик P-V и I-V модель PV строится и реализуется с помощью Matlab [75,76]. Чтобы сделать его удобным для сопровождения и читаемым, используется каждая функция для записи осмысленными буквами, например, функция обратного тока насыщения относится к реализации уравнения (1.9). Чтобы знать, как работает фотоэлектрическая система и оценить производительность любой фотоэлектрической системы необходимо представить её в виде математической модели. Рисунок 2.2 представляет функциональную схему предлагаемой фотоэлектрической системы в этой диссертации [77].

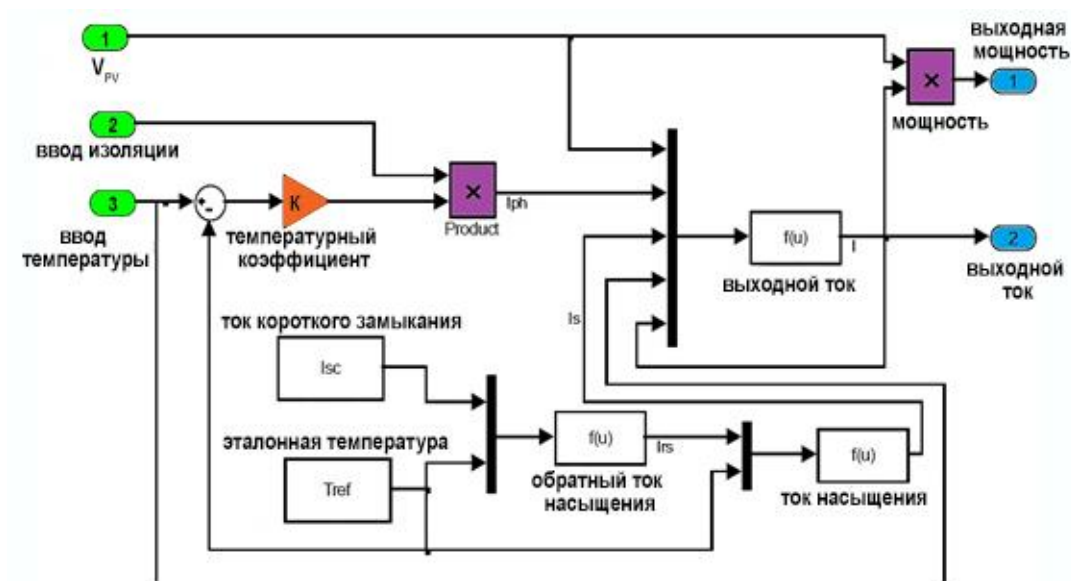


Рисунок 2.1: Реализация блок-схемы проектной модели.

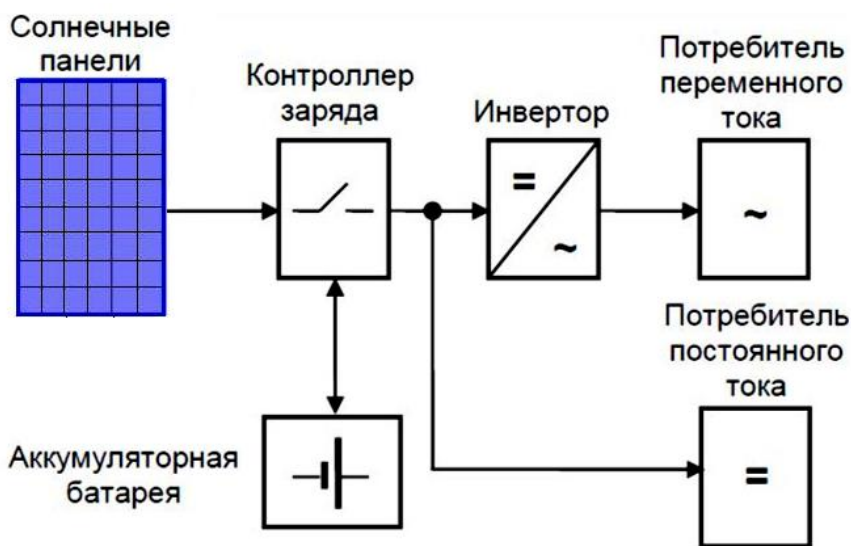


Рисунок 2.2. Блок-схема солнечной энергетической системы

Все данные, необходимые в процессе моделирования, были взяты у производителя солнечных панелей. В таблице 3 приведены электрические характеристики фотоэлектрического модуля при $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ и 1000 Вт/м^2 , использованные в этом примере (см. 1.3.1) [78,79].

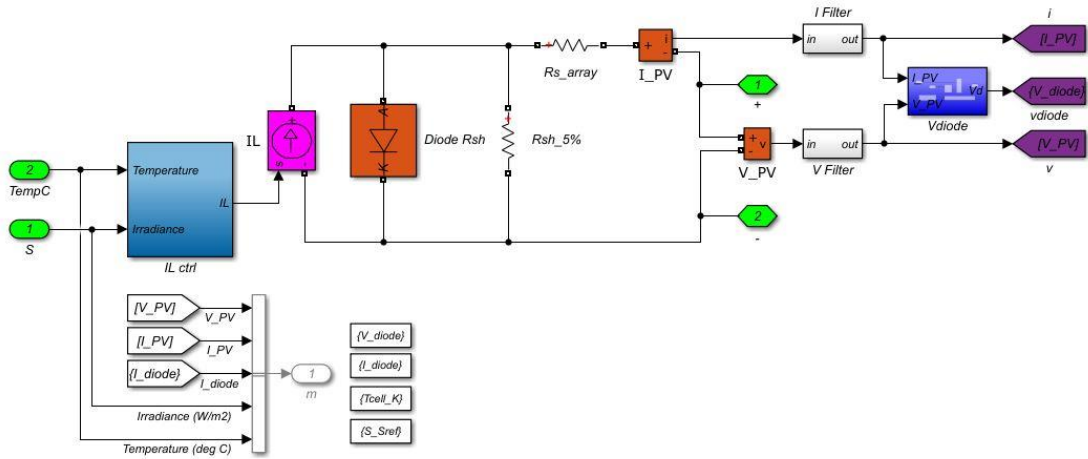


Рисунок 2.3. Подсистема реализации обобщенной модели PV.

Фотоэлектрические модули были спроектированы и смоделированы в Matlab, как показано на рисунке 2.3, с использованием следующих математических уравнений:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{AKT} \right) - 1 \right] \quad (2.1)$$

$$E_{th} = \frac{KT}{q} \quad (2.2)$$

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{AE_{th}} \right) - 1 \right] \quad (2.3)$$

$$a = A \cdot V_{th} \quad (2.4)$$

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{a} \right) - 1 \right] \quad (2.5)$$

Следующие уравнения 2.6 и 2.7 используются для расчета значений параметров фотоэлектрической схемы [80].

$$I_{ph-ref} = I_{sc-ref} \quad (2.6)$$

$$\begin{cases} a_{ref} = \frac{\beta_{oc} \cdot T_{jref} - V_{ocref} + E_g}{(T_{jref} \cdot \alpha_{sc}/I_{phref}) - 3} \\ I_{0ref} = \frac{I_{phref}}{\exp[(V_{ocref}/a_{ref}) - 1]} \\ R_s = \frac{a_{ref} \ln[1 - (I_{TMMref}/I_{phref})] - V_{TMMref} + V_{ocref}}{I_{TMMref}} \end{cases} \quad (2.7)$$

$$\begin{cases} I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} * [I_{phref} + \alpha_{sc} * (T_j - T_{ref})] \\ I_0 = I_{0ref} \cdot \exp\left[\left(\frac{E_g}{a}\right)\left(1 - \frac{T_{jref}}{T}\right)\right] \cdot \left(\frac{T}{T_{jref}}\right)^3 \\ R_s = R_{s-ref} \\ a = a_{ref} \cdot (T/T_{jref}) \end{cases} \quad (2.8)$$

Как было отмечено ранее, уравнение (1.6) является нелинейным уравнением, которое можно решить с помощью алгоритма Левенберга-Марквардта, и при анализе можно использовать различные методы для нахождения параметров. С помощью аналитического метода были найдены пять параметров I_L , I_0 , R_s , R_{sh} и A при температуре 25°C и уровне солнечной радиации в ограниченных условиях, I_{sc} , V_{oc} , I_{TMM} и V_{TMM} и с использованием определений R_{so} . Уравнение (1.6) было переписано с использованием свойства I_{pv} по-другому следующим образом:

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{AV_{th}}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad (2.9)$$

Для $V_{pv} = V_{oc}$, $I_{pv} = 0$, получим

$$0 = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V_{oc}}{AV_{th}}\right) - 1 \right] - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (2.10)$$

Для $V_{pv} = 0$, $I_{ph} = I_{sc}$, получим:

$$I_{sc} = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{I_{sc} R_s}{AV_{th}}\right) - 1 \right] - \frac{I_{sc} R_s}{R_{sh}} \quad (2.11)$$

В уравнении 2.11 заменено I_{ph} на его значение, полученное из уравнения 2.10:

$$I_{sc} = I_0 \left(\exp \frac{V_{oc}}{AV_{th}} - 1 \right) + \frac{V_{oc}}{R_{sh}} - I_0 \left[\exp \left(\frac{I_{sc}R_s}{AV_{th}} \right) - 1 \right] - \frac{I_{sc}R_s}{R_{sh}} \quad (2.12)$$

$$I_{sc} = I_0 \left(\exp \frac{V_{oc}}{AV_{th}} - \exp \frac{I_{sc}R_s}{AV_{th}} \right) + \frac{V_{oc}}{R_{sh}} - \frac{I_{sc}R_s}{R_{sh}} \quad (2.13)$$

Таким образом

$$I_0 \left(\exp \frac{V_{oc}}{AV_{th}} - \exp \frac{I_{sc}R_s}{AV_{th}} \right) + \frac{V_{oc}}{R_{sh}} - I_{sc} \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) = 0 \quad (2.14)$$

по отношению к току получаем уравнение 2.9:

$$\begin{aligned} 1 &= -I_0 \left(\frac{dV_{pv}}{dI_{pv}} \frac{1}{AV_{th}} + \frac{R_s}{AV_{th}} \right) \exp \frac{V_{pv} + I_{pv}R_s}{AV_{th}} - \frac{1}{R_{sh}} \frac{dV_{pv}}{dI_{pv}} - \frac{R_s}{R_{sh}} \\ &= -\frac{I_0}{AV_{th}} \exp \frac{V_{pv} + I_{pv}R_s}{AV_{th}} \frac{dV_{pv}}{dI_{pv}} - \frac{I_0R_s}{AV_{th}} \exp \frac{V_{pv} + I_{pv}R_s}{AV_{th}} - \frac{1}{R_{sh}} \frac{dV_{pv}}{dI_{pv}} \\ &\quad - \frac{R_s}{R_{sh}} \end{aligned} \quad (2.15)$$

$$\begin{aligned} & - \frac{dV_{pv}}{dI_{pv}} \left(\frac{I_0}{AV_{th}} \exp \frac{V_{pv} + I_{pv}R_s}{AV_{th}} + \frac{1}{R_{sh}} \right) - \frac{I_0R_s}{AV_{th}} \exp \frac{V_{pv} + I_{pv}R_s}{AV_{th}} - \frac{R_s}{R_{sh}} - 1 \\ &= 0 \end{aligned} \quad (2.16)$$

Для $V_{pv} = V_{oc}$ определяем

$$\left(\frac{dV_{pv}}{dI_{pv}} \right)_{V_{pv}=V_{oc}} = -R_{so} \quad (2.17)$$

находим, подставляя уравнение 2.17 в уравнении. 2.16

$$\begin{aligned} R_{so} \left(\frac{I_0}{AV_{th}} \exp \frac{V_{oc}}{AV_{th}} + \frac{1}{R_{sh}} \right) - \frac{I_0R_s}{AV_{th}} \exp \frac{V_{oc}}{AV_{th}} - \frac{R_s}{R_{sh}} - 1 &= 0 \\ (R_{so} - R_s) \left(\frac{I_0}{AV_{th}} \exp \frac{V_{oc}}{AV_{th}} + \frac{1}{R_{sh}} \right) - 1 &= 0 \end{aligned} \quad (2.18)$$

Для условия $I_{sc} = I_{pv}$ определяем:

$$\left(\frac{dV_{pv}}{dI_{pv}} \right)_{I_{pv} = I_{sc}} = -R_{sh0} \quad (2.19)$$

Заменяя уравнение 2.19 в уравнении 2.16, находим:

$$R_{sh0} \left(\frac{I_0}{AV_{th}} \exp \frac{I_{sc} R_s}{AV_{th}} + \frac{1}{R_{sh}} \right) - \frac{I_0 R_s}{AV_{th}} \exp \frac{I_{sc} R_s}{AV_{th}} - \frac{R_s}{R_{sh}} - 1 = 0$$

$$(R_{sh0} - R_s) \left(\frac{I_0}{AV_{th}} \exp \frac{I_{sc} R_s}{AV_{th}} + \frac{1}{R_{sh}} \right) - 1 = 0 \quad (2.20)$$

Разделив на $(R_{sh0} - R_s)$ находим:

$$\frac{1}{R_{sh}} - \frac{1}{R_{sh0} - R_s} + \frac{I_0}{AV_{th}} \exp \frac{I_{sc} R_s}{AV_{th}} = 0 \quad (2.21)$$

В точке максимальной мощности имеем

$$I_{TMM} = I_{ph} - I_0 \left(\exp \frac{V_{TMM} + I_{TMM} R_s}{AV_{th}} - 1 \right) - \frac{V_{TMM} + I_{TMM} R_s}{R_{sh}} \quad (2.22)$$

Из уравнения 2.10 получаем:

$$I_{ph} = I_0 \left(\exp \frac{V_{oc}}{AV_{th}} - 1 \right) + \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (2.23)$$

Подставляя уравнение 2.23 в уравнение 2.22, получаем:

$$I_{TMM} = I_0 \left(\exp \frac{V_{oc}}{AV_{th}} - 1 \right) + \frac{V_{oc}}{R_{sh}} - I_0 \left(\exp \frac{V_{TMM} + I_{TMM} R_s}{AV_{th}} - 1 \right) - \frac{V_{TMM} + I_{TMM} R_s}{R_{sh}} \quad (2.24)$$

$$I_0 \exp \frac{V_{oc}}{AV_{th}} + \frac{V_{oc} - V_{mpp}}{R_{sh}} - \left(I_0 + I_{TMM} \frac{R_s}{R_{sh}} \right) - I_0 \exp \frac{V_{TMM} + I_{TMM} R_s}{AV_{th}} = 0 \quad (2.25)$$

В своих работах Кеннеруд и Чарльз показали, что четыре параметра A , R_s , I_0 и R_{sh} могут быть определены методом Ньютона-Рафсона путем одновременного решения нелинейных уравнений 2.14, 2.18, 2.21 и 2.25. Однако определить эти параметры затруднительно, так как этот метод требует длительных вычислений и начальных условий для строгой сходимости. Следовательно, для

непосредственного определения этих параметров необходимо иметь аналитические выражения.

Так как $R_s \ll R_{sh}$, примем для определения параметров, что

$$1 + R_s/R_{sh} \approx 1$$

предполагаем также в уравнении 2.14

$$\exp \frac{V_{oc}}{AV_{th}} \gg \exp \frac{I_{sc}R_s}{AV_{th}} \quad (2.26)$$

предполагаем в уравнении 2.18:

$$\frac{I_o}{AV_{th}} \exp \frac{V_{oc}}{AV_{th}} \gg \frac{1}{R_{sh}} \quad (2.27)$$

В уравнении 2.17, предполагаем, что: $\frac{I_o}{AV_{th}} \exp \frac{V_{pv} + I_{vp} R_{serial}}{AV_{th}} \ll 10\%$ остальных членов. С этими упрощениями получаем из уравнений: 2.14, 2.18, 2.21 и 2.25:

$$I_o \exp \frac{V_{oc}}{AV_{th}} - I_{sc} + \frac{V_{oc}}{R_{sh}} = 0 \quad (2.28)$$

$$(R_{s0} - R_s) \frac{I_o}{AV_{th}} \exp \frac{V_{oc}}{AV_{th}} - 1 = 0 \quad (2.29)$$

$$R_{sh} = R_{sho} \quad (2.30)$$

$$I_o \exp \frac{V_{oc}}{AV_{th}} + \frac{V_{oc} - V_{TMM}}{R_{sh}} - I_{TMM} - I_o \exp \frac{V_{TMM} + I_{TMM} \cdot R_s}{AV_{th}} = 0 \quad (2.31)$$

В результате получаем аналитическое выражение. А из этих последних уравнений, и в итоге получаем следующее уравнение:

$$I_o = \left(I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \right) \exp \left(- \frac{V_{oc}}{AV_{th}} \right) \quad (2.32)$$

Из уравнения 2.29 имеем:

$$R_{s0} - R_s = \frac{1}{\frac{I_o}{AV_{th}} \exp \frac{V_{oc}}{AV_{th}}} \quad (2.33)$$

$$R_s = R_{s0} - \frac{1}{\frac{I_o}{AV_{th}} \exp \frac{V_{oc}}{AV_{th}}} = R_{s0} - \frac{1}{\frac{1}{AV_{th}} \left(I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \right)} \quad (2.34)$$

Подставляя уравнение 2.32 в уравнение 2.31, получаем следующее уравнение:

$$I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} + \frac{V_{oc} - V_{TMM}}{R_{sh}} - I_{TMM} = I_0 \exp \frac{V_{TMM} + I_{TMM} \cdot R_s}{AV_{th}}$$

$$I_{sc} - \frac{V_{TMM}}{R_{sh}} - I_{TMM} = \left(I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \right) \exp \left(-\frac{V_{oc}}{AV_{th}} + \frac{V_{TMM} + I_{TMM} \cdot R_s}{AV_{th}} \right) \quad (2.35)$$

или заменив уравнение 2.34 в этом уравнении:

$$\frac{I_{sc} - \frac{V_{TMM}}{R_{sh}} - I_{TMM}}{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}} = \exp \left(\frac{-V_{oc} + V_{TMM} + I_{TMM} R_{s0} - \frac{I_{TMM} \cdot A \cdot V_{th}}{I_{sc} - V_{oc}/R_{sh}}}{AV_{th}} \right)$$

$$\ln \left(\frac{I_{sc} - \frac{V_{TMM}}{R_{sh}} - I_{TMM}}{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}} \right) = \frac{-V_{oc} + V_{TMM} + I_{TMM} R_{s0}}{AV_{th}} - \frac{I_{TMM}}{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}}$$

Наконец, получаем выражение для А:

$$A = \frac{V_{TMM} + I_{TMM} R_{s0} - V_{oc}}{V_{th} \left[\ln \left(I_{sc} - \frac{V_{TMM}}{R_{sh}} - I_{TMM} \right) - \ln \left(I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \right) + \left(\frac{I_{TMM}}{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}} \right) \right]} \quad (2.36)$$

Параметры I_0 , R_s и I_{ph} получаются по формуле:

$$\begin{cases} I_0 = \left(I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \right) \exp \left(-\frac{V_{oc}}{AV_{th}} \right) \\ R_s = R_{s0} - \frac{AV_{th}}{I_0} \exp \left(-\frac{V_{oc}}{AV_{th}} \right) \\ I_{ph} = I_{sc} \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) + I_0 \left(\exp \frac{I_{sc} R_s}{AV_{th}} - 1 \right) \end{cases} \quad (2.37)$$

Выходные характеристики как P-V, так и IV обобщенной фотоэлектрической модели Delta BST 260-24P ячейки показаны на рисунках (2.4-2.5). Как показано на рисунке 2.4 и 2.5, параметры фотоэлементов имеют ярко выраженный нелинейный характер, то есть выходной ток и мощность фотоэлемента зависят от рабочего напряжения и температуры станции, помимо солнечной инсоляции [81]. Находим

из рисунка 2.4 (I) и из рисунка 2.4 (II) эти параметры показывают, что по мере увеличения рабочей температуры максимальная выходная мощность уменьшается, а ток короткого замыкания фотогальванического элемента увеличивается. Поскольку падение напряжения намного больше, чем увеличение выходного тока, полезная мощность уменьшается при более высоких температурах [82,83].

С другой стороны, заметим, что из рисунка 2.5 (I) и 2.5 (II) видно, что с увеличением солнечной инсоляции увеличивается максимальная выходная мощность и увеличивается ток короткого замыкания фотоэлектрического модуля. Причина в том, что напряжение холостого хода логарифмически связано с солнечным излучением, а ток короткого замыкания прямо пропорционален интенсивности излучения.

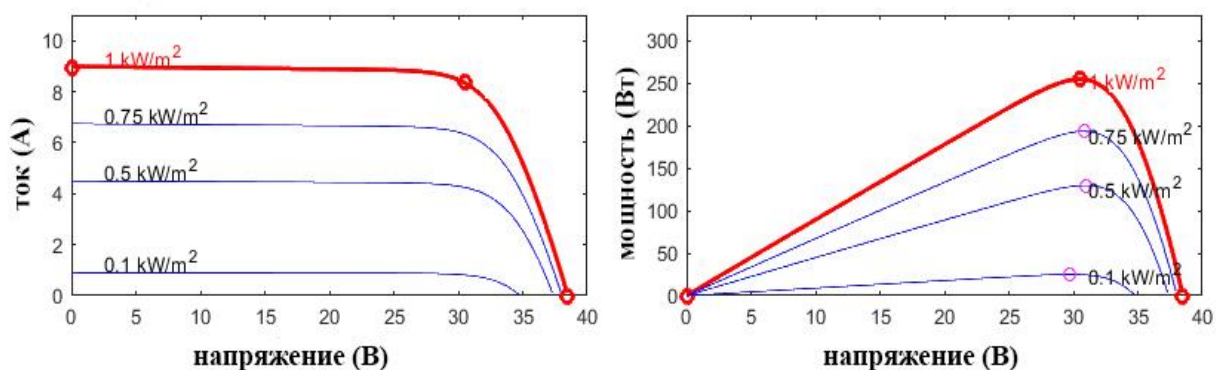


Рисунок 2.4. Вольтамперная и мощностная характеристики фотоэлемента при различных значениях освещенности.

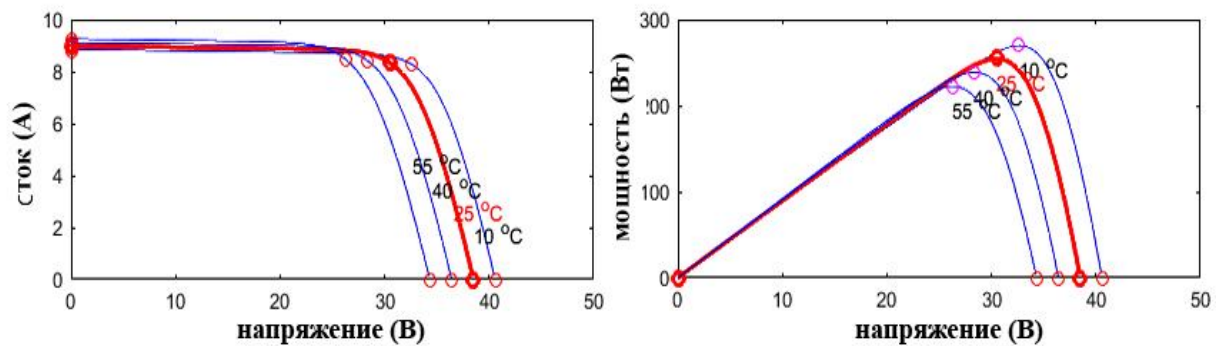


Рисунок 2.5. Вольтамперные и мощностная характеристики при различных температурах

Практические эксперименты были проведены с использованием солнечной панели (модуля) Delta BST 260-24P и переменного сопротивления в дополнение к измерительным приборам для измерения напряжения, тока и солнечного излучения, как показано на рисунке 2.6.



Рисунок 2.6. Практический эксперимент в Севастопольском государственном университете

2.1.1 Повышение эффективности фотоэлектрической панели за счет использования метода отбора в точке максимальной мощности (ТММ)

2.1.1.1 Метод возмущения и наблюдения (P&O):

Этот алгоритм основан на создании системой небольшого возмущения; возмущение вызывает изменение мощности солнечного модуля. Если мощность увеличивается, возмущение должно поддерживаться в этом направлении, в противном случае направление возмущения меняется на противоположное. Мощность панели начинает уменьшаться после достижения пикового значения в течение определенного периода, поэтому возмущение меняет свое направление [84]. В установившемся режиме система колеблется около точки пиковой мощности. Когда мощность достигает пикового значения, изменение мощности будет небольшим. Блок-схема алгоритма P&O отслеживания максимальной мощности показана на рисунке 2.8, где $V_{(n)}$, $I_{(n)}$ и $P_{(n)}$ – напряжение, ток и мощность фотоэлектрической панели соответственно. На рисунке 2.7 показана схема Simulink предлагаемой системы, в которой используются солнечная панель и понижающий преобразователь постоянного тока, управляемый контроллером ТММ [85,86].

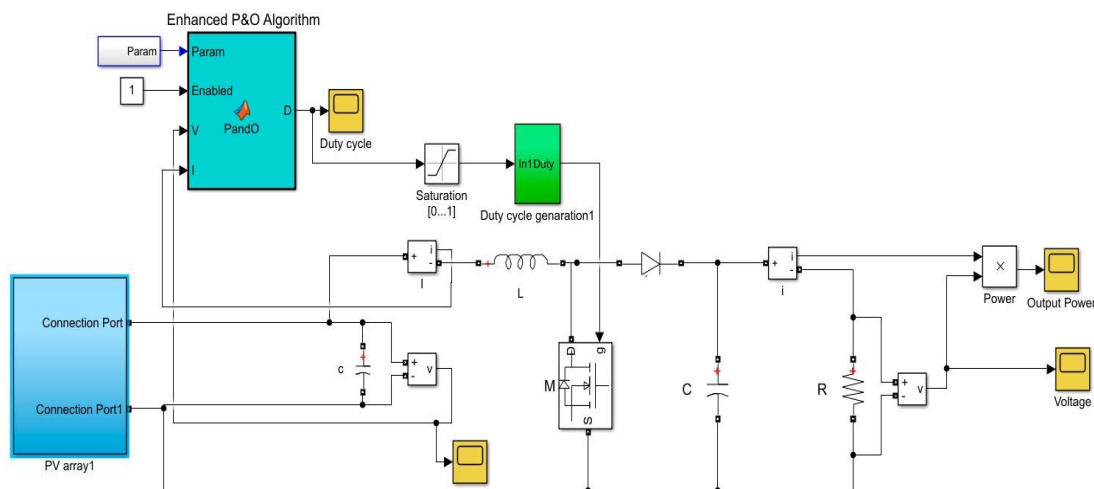


Рисунок 2.7. Модель солнечного фото-эмулятора с понижающим преобразователем.

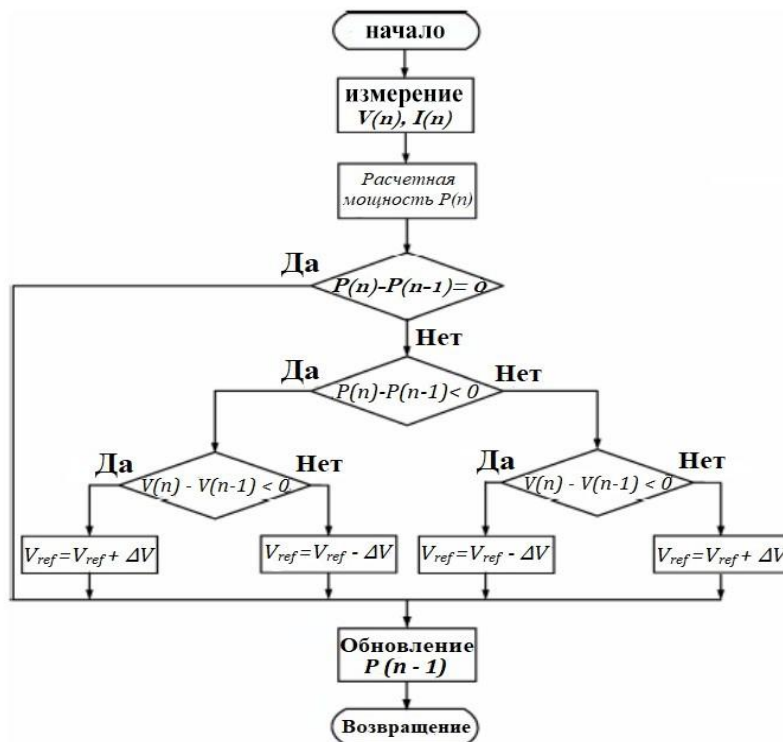


Рисунок 2.8. Блок-схема алгоритма метода «Возмущение и наблюдение»

2.1.1.2 Метод инкрементной проводимости (ИП):

Метод инкрементной проводимости работает, когда значение производной мощности фотоэлектрического модуля равно нулю в точке максимального момента (ТММ), отрицательные результаты находятся справа от кривой ТММ, а положительные результаты будут в левой области кривой точки максимального момент. Уравнение алгоритма ИП:

$$\frac{dP}{dv} = \frac{d(vi)}{dv} = I + \frac{dI}{dv} \quad (2.38)$$

ТММ достигается, когда $\left(\frac{dP}{dv}\right)$

$$\frac{dI}{dv} = -\frac{I}{v} \quad (2.39)$$

Теоретически точка максимальной мощности фотоэлектрической системы может быть найдена путем сравнения I/V с dI/dV , как показано на рисунке 2.9, где dI/dV – Инкрементальная проводимость и I/V – Мгновенная проводимость, опорное напряжение работы массива фотоэлектрических модулей равно V_r .

V_{TMM} должно быть равно V_r , когда в этот момент достигается ТММ. Это происходит, когда система сохраняет выходное напряжение на ТММ до тех пор, пока не произойдет изменение атмосферных условий или не произойдет изменение самой ТММ, поэтому целью алгоритма ИС является принятие решения об увеличении или уменьшении V_r для получения доступа к новой ТММ [87].

Основным преимуществом алгоритма ИП является меньшее колебательное поведение вокруг ТММ в дополнение к его способности отслеживать изменяющиеся погодные условия с высокой точностью и имеет более низкую частоту ошибок, чем метод Р&о и другие методы, такие как метод «восхождения на вершину» и т. д. [88,89].

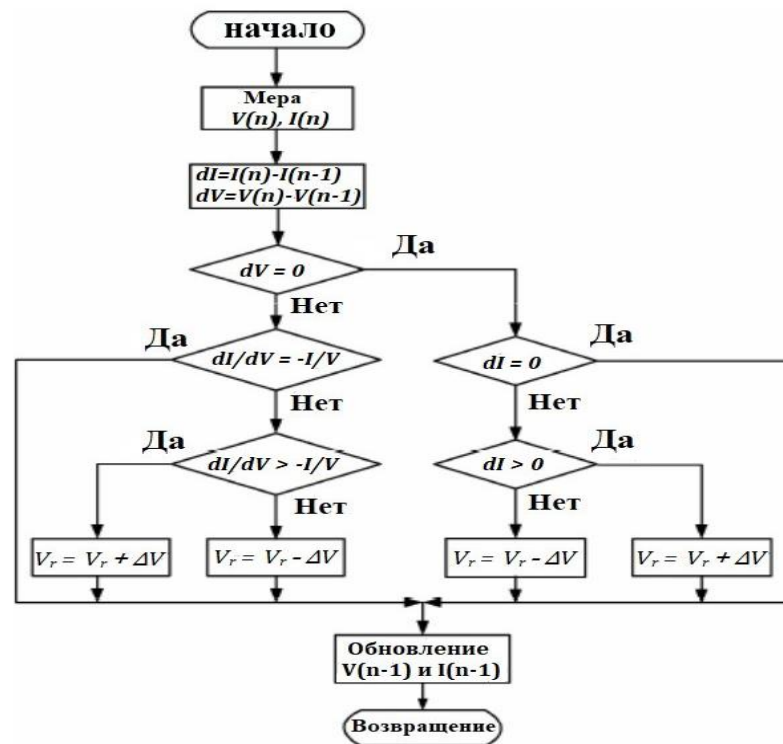


Рисунок 2.9. Блок-схема алгоритма метода ИП

2.1.2 Сравнение методик отбора максимальной мощности и выбор оптимального метода исследования

Чтобы определить эффективность и точность методов определения максимальной мощности, фотоэлектрическая панель была смоделирована программой Matlab в условиях алгоритмов ТММ при температуре 25 °С и излучении 1000 Вт/м². Характеристика фотоэлектрической панели приведена в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Технические характеристики для солнечных панелей Delta BST 260-24 P [109].

Солнечный модуль		Delta BST 260-24 P
параметр		
Максимальная мощность (P_{max})		260 Вт
Напряжение при P_{max} (V_{mp})		30,5 В
Ток при P_{max} (I_{mp})		8,36 А
Ток короткого замыкания (I_{sc})		8,94 А
Напряжение холостого хода (V_{oc})		38,5 В
Температура Коэффициент I_{sc}		0,036 %/°C
Температура Коэффициент V_{oc}		-0,34 %/°C
Температура Коэффициент силы		-0,39 %/°C
НОСТ		47±2 °C
Количество серийных ячеек, N_s		60(6 × 10)

Был проведен анализ характеристик мощности, тока и напряжения фотоэлектрического модуля с использованием технологии и без использования технологии ТММ. Проведено сравнение различных технологий ТММ с различными методами, такими как предлагаемый метод инкрементной проводимости, метод Р&О и метод «восхождение на вершину», которые показаны на рисунках 2.10, 2.11 и 2.12 по результатам в системе Matlab для модуля PV 260Вт.

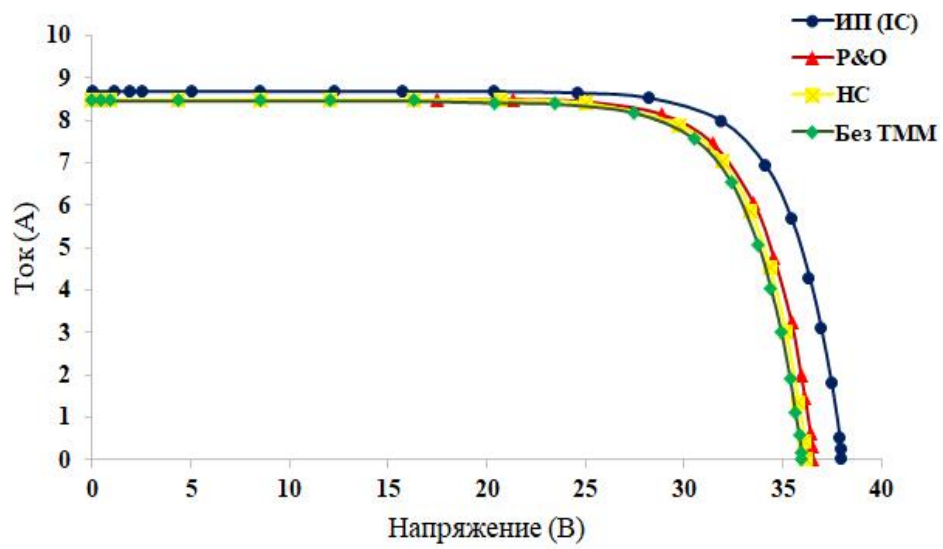


Рисунок 2.10. ВАХ при 1000 Вт/м^2 и $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (C1)

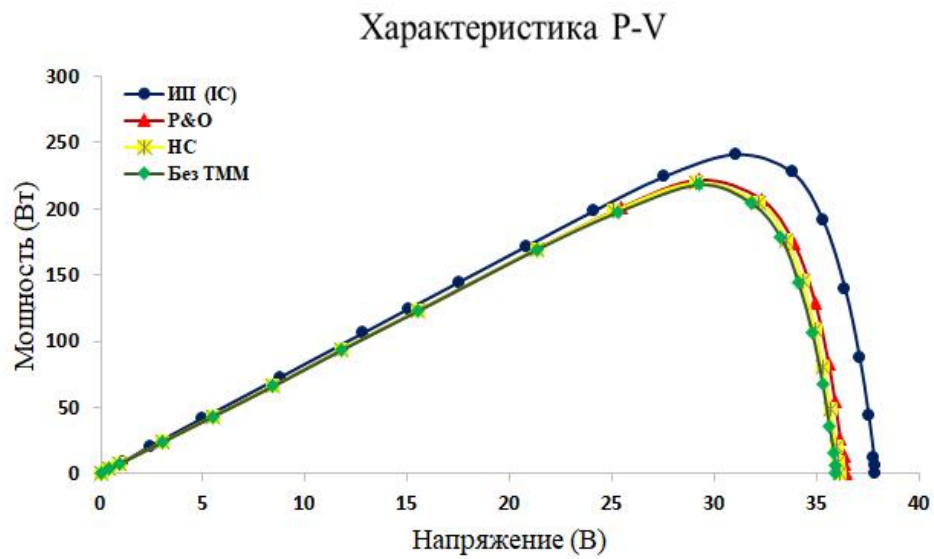


Рисунок 2.11. P-V характеристики при 1000 Вт/м^2 и $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (C1)

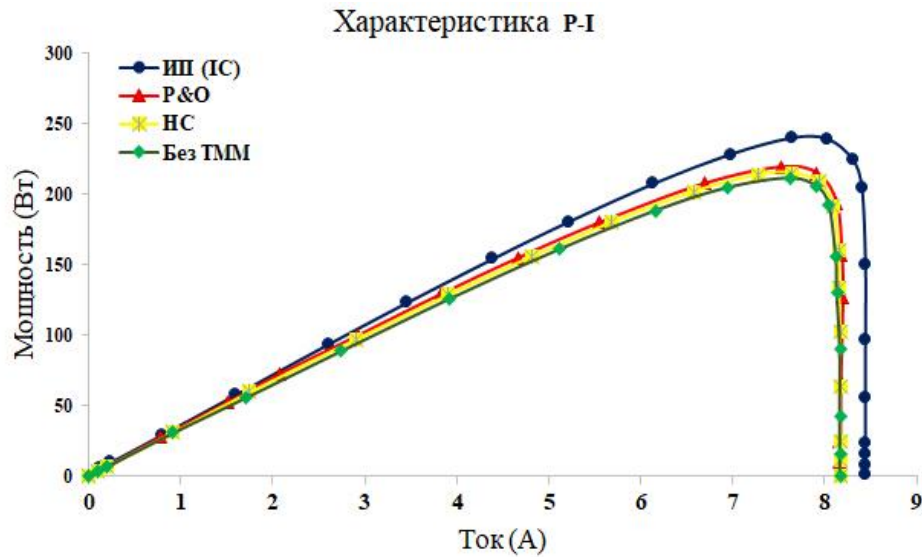


Рисунок 2.12. P-I характеристики при 1000 Вт/м² и 25 °С (С1)

Генерируемый ток увеличивается с увеличением солнечной радиации, и максимальная выходная мощность также увеличивается с увеличением солнечной радиации. Кроме того, напряжение остается почти постоянным и не сильно меняется. Как показано на рисунках 2.13, 2.14 и 2.15. Эти рисунки также показывают, что, когда солнечная изоляция уменьшается, ток короткого замыкания фотоэлектрического модуля уменьшается, а также уменьшается максимальная выходная мощность.

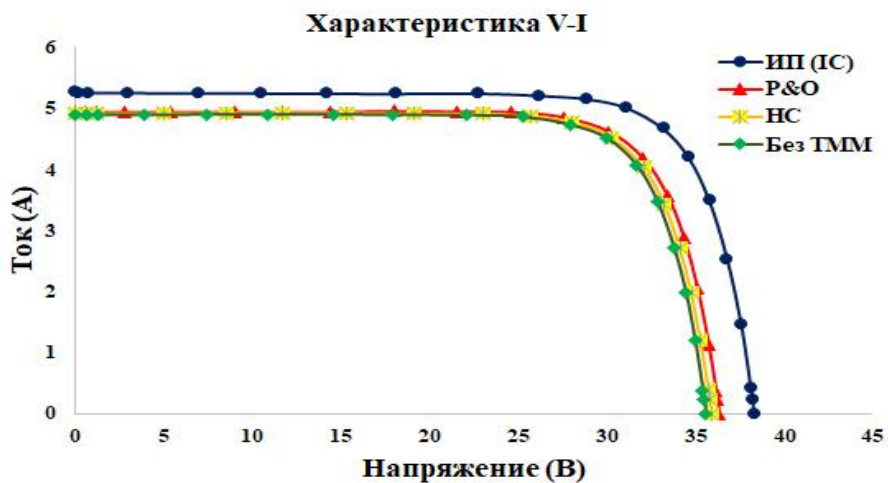


Рисунок 2.13. ВАХ при 600 Вт/м² и 25 °С (С2)

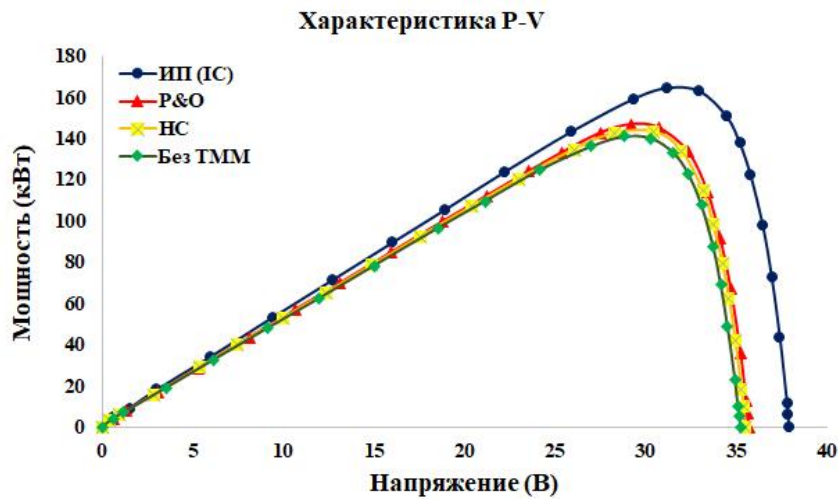


Рисунок 2.14. P-V характеристики при 600 Вт/м^2 и $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (C2)

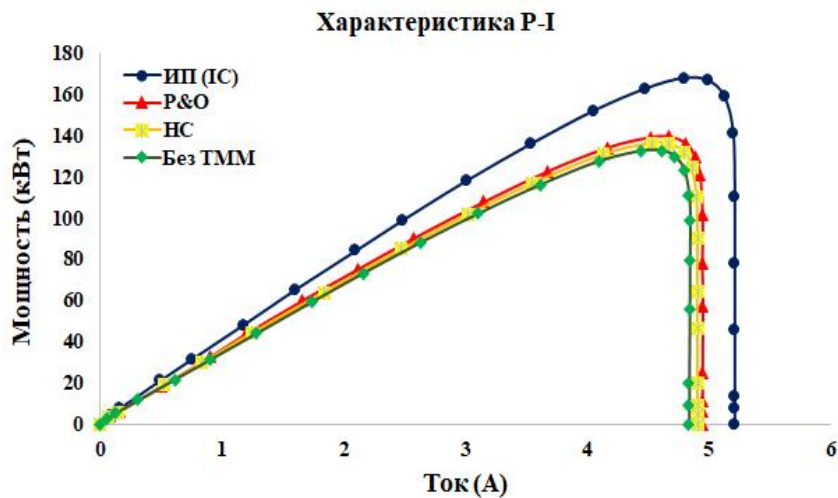


Рисунок 2.15. P-I характеристики при 600 Вт/м^2 и $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (C2)

На рисунке 2.16, 2.17 и 2.18 описаны графики характеристик V-I, P-V и P-I при различных температурах для фотоэлектрического модуля. Солнечная инсоляция, температура и рабочее напряжение элементов являются основными факторами, от которых в основном зависят выходная мощность, ток и напряжение фотоэлементов.

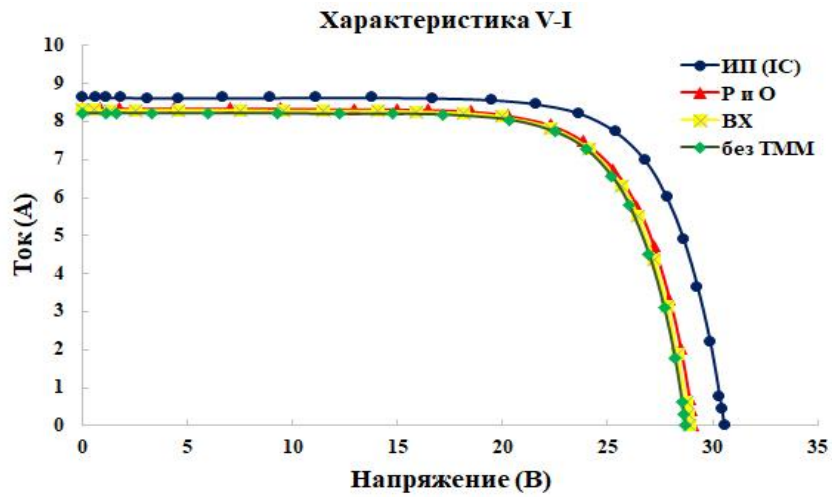


Рисунок 2.16. ВАХ при 1000 Вт/м^2 и $40 \text{ }^\circ\text{C}$ (С3)

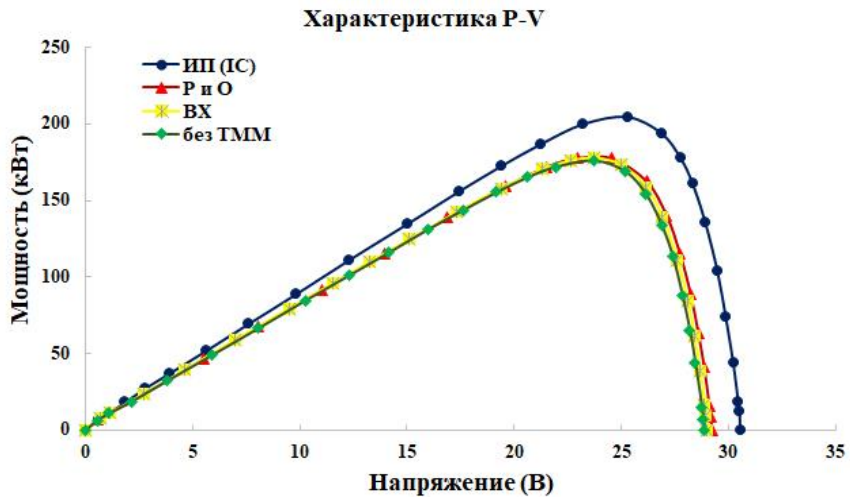


Рисунок 2.17. P-V характеристики при 1000 Вт/м^2 и $40 \text{ }^\circ\text{C}$ (С3)

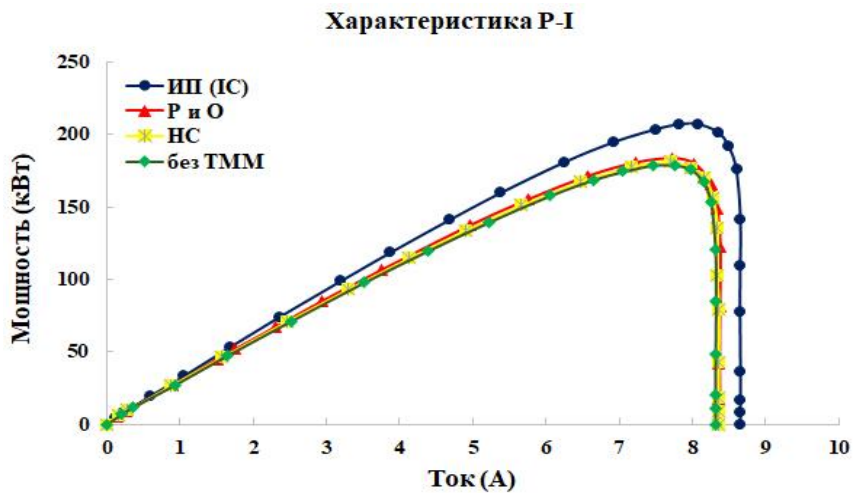


Рисунок 2.18. P-I характеристики при 1000 Вт/м^2 и $40 \text{ }^\circ\text{C}$ (С3)

В таблице 2.2 описана выходная мощность солнечного фотоэлектрического модуля, где C_1 , C_2 и C_3 представляют собой выходную мощность при инсоляции 1000, 600, 1000 Вт/м² и температуре 25, 25, 40 °С соответственно.

Таблица 2.2. Сравнение выходной мощности солнечного фотоэлектрического модуля с использованием ТММ технологий

№:	Метод ТММ	C_1	C_2	C_3
1	Без ТММ	214,2	150,1	182,1
2	Инкрементальная проводимость (ИП)	244	165,3	209,8
3	P&O	222,1	158,4	190,2
4	НС	218,4	155,6	185,9

Выполнено моделирование, созданное средой Matlab/Simulink, с использованием стандартных электрических характеристик фотоэлектрического модуля Delta BST 260-24 P, в котором было проведено сравнение трех различных методов ТММ. Эта несложная модель дает быстрый способ предсказать поведение фотоэлектрического модуля, а мощность отслеживания всех трех алгоритмов ТММ близка к соответствующей максимальной мощности, было принято во внимание, что результаты моделирования строго согласуются с конкретным листом паспортных данных производителя солнечной панели.

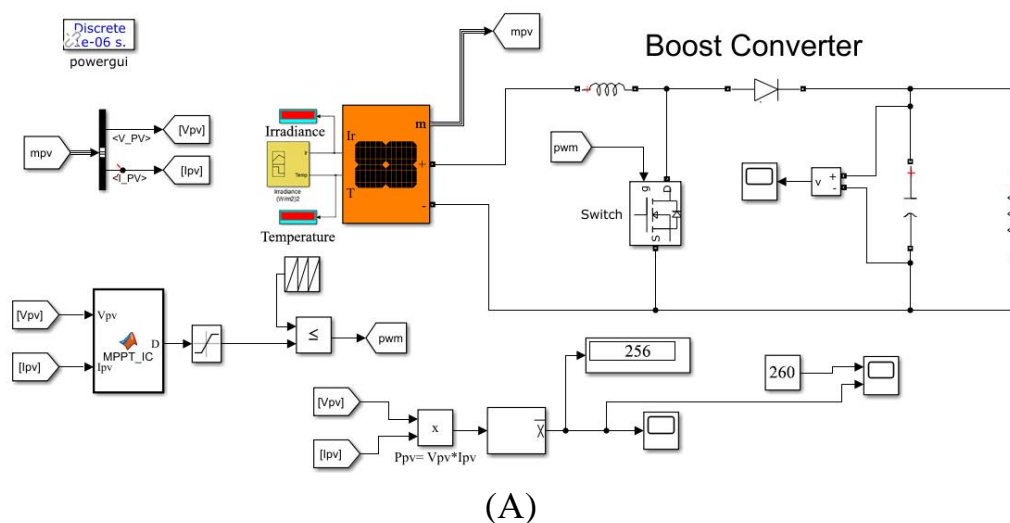
Высокая точность результатов, полученных в данной работе, позволила сделать вывод о том, что метод инкрементной проводимости (ИП) фотоэлектрического модуля более эффективен и имеет сравнительно большую выходную мощность, чем метод P&O и Hill Climbing (НС) для различных условий.

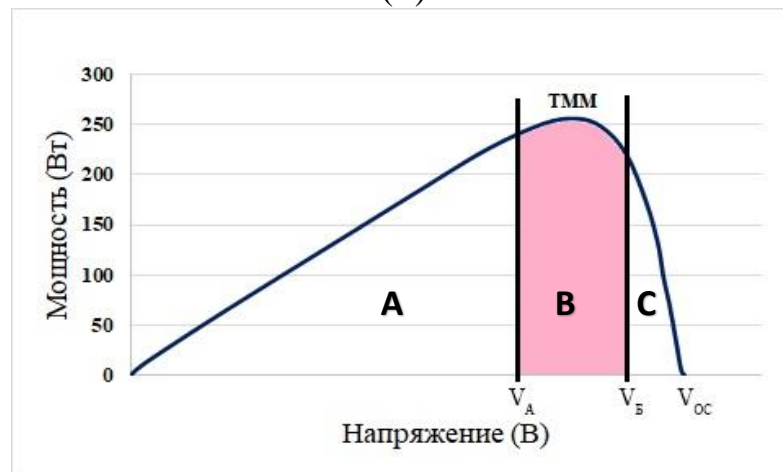
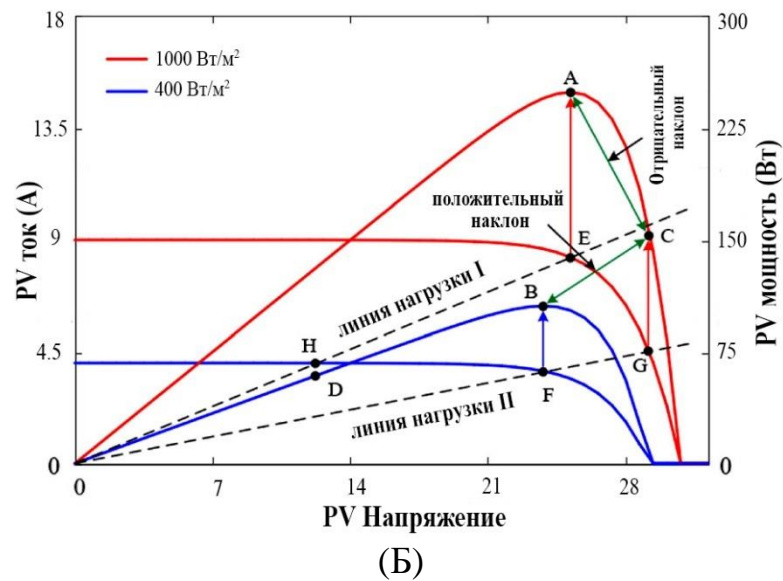
2.1.3 Предлагаемый алгоритм инкрементной проводимости (ИП)

Алгоритм инкрементной проводимости зависит от наклона кривой P-V, то есть в основе алгоритма ИП лежит наклон кривой P-V, где dV и dI — изменения

напряжения и тока, которые напрямую определяются сопротивлением нагрузки и солнечным излучением соответственно. В результате алгоритм должен учитывать влияние солнечной радиации и изменений нагрузки на ток и напряжение фотоэлектрического модуля. Как показано на рисунке 2.19 Б, когда фотоэлектрическая система работает на линии нагрузки II (точка F) и резко увеличивается солнечное излучение, рабочая точка фотоэлектрической системы перемещается в точку G. Следовательно, увеличиваются как напряжение, так и ток. И наоборот, когда фотоэлектрическая система работает на линии нагрузки I (точка E) и солнечное излучение внезапно уменьшается, рабочая точка фотоэлектрической системы перемещается в точку H. Таким образом, и напряжение, и ток уменьшаются.

В обычном алгоритме инкрементальной проводимости эти два типа изменений не учитываются. Между тем, если фотоэлектрическая система работает на линии нагрузки I и сопротивление нагрузки увеличивается, фотоэлектрическая система будет работать на линии нагрузки II, следовательно, напряжение фотоэлектрического модуля увеличивается, а ток фотоэлектрического модуля уменьшается. В качестве альтернативы напряжение уменьшается, а ток увеличивается, когда сопротивление нагрузки уменьшается.





(C)

Рисунок 2.19: (А) Моделирование Matlab предложенного алгоритма для определения МРРТ для солнечной панели, (Б) ВАХ и P–V кривые облучения 1000 Вт/м² и 400 Вт/м².

Модифицированный алгоритм ИП обеспечивает отбор мощности при увеличении как напряжения, так и тока по мере увеличения солнечной энергии. Отсюда следует, что при проверке того, достигнута ли ТММ и увеличиваются ли напряжение и ток, может быть обнаружено неожиданное увеличение солнечной энергии. Соответственно, допустимая ошибка в уравнении (2,40) принимается для определения того, достигнут ли подход ТММ.

$$\left| \frac{dI}{dV} + \frac{I}{V} \right| < 0.065 \quad (2.40)$$

$$V_{\text{ТММ}} = 65\% V_{oc} - 85\% V_{oc} \quad (2.41)$$

Предложенная методика подтверждается при применении усовершенствованного алгоритма ИП, реализованного путем разделения P-V характеристики на три области, обозначаемые как область А, область В и область С, где область А составляет от 0 до 65%V_{oc}, область В составляет от 65% V_{oc} до 85% V_{oc}, а область с составляет от 85% V_{oc} до V_{oc}. Область В — это область, включающая ТММ. Понятно, что усовершенствованный алгоритм ИП должен найти ТММ только в пределах области В, которая колеблется от 65 % до 85 %, как показано на уравнение 2.41. Кривая PV была разделена на три области, чтобы сократить затраты и время на поиск ТММ.

Кроме того, можно сказать, что предложенный метод проверен, а также аддитивный поиск проверяет, была ли достигнута точка максимальной мощности (ТММ), используя уравнение 2.41. При этом если алгоритм устанавливает V_{ар} равным 1, тогда уравнение 2.40 выполняется, а если V_{ар} равно нулю, то нет. Предложенный метод также проверяет, были ли увеличены напряжение и ток. В результате рабочий цикл увеличивается, а не уменьшается, как в случае с традиционным подходом. В результате обновления алгоритма ИП был устранён неправильный выбор, получающийся при использовании традиционного алгоритма. Это значит, что система ТММ временно устанавливает ток фотоэлектрической панели на ноль в усовершенствованном алгоритме ИП, позволяя измерять напряжение холостого хода панелей. Блок-схема на рисунке 2.20 описывает работу модифицированного алгоритма ИП.

На втором этапе – увеличение солнечной радиации и температуры соответственно, при повышении температуры до $T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, и падении до $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, при таком же изменении солнечной радиации, как и в первом состоянии. На рисунке 2.22 показано сравнение результатов испытаний по обычному методу ИП и результатов испытаний по предлагаемой методике.

Как видно из этих рисунков, при использовании предложенного алгоритма допускается погрешность 0,065. В отличие от традиционного алгоритма, стационарные колебания сведены к минимуму, а мощность колеблется, что может привести к потере фотоэлектрического преобразования энергии. При использовании традиционного алгоритма, как показано на рисунках 2.21 и 2.22, при резком увеличении солнечной радиации мощность увеличивается на величину более 255,5 Вт, в то время как обычная ИС меняет направление, мощность отклоняется на величину не менее 244 Вт и из-за неправильного решения традиционной технологии, системе требуется много времени, чтобы достичь ТММ, даже при достижении ТММ, как показано на рисунках 2.21 и 2.22. С другой стороны, предлагаемая технология обнаруживает быстрое увеличение излучения и принимает правильное решение с точки зрения рабочего цикла. В результате мощность с первого шага сходится к новой ТММ и удерживается там. Более того, для достижения ТММ требуется всего 0,001 секунды. Следовательно, мощность сходится быстрее с предлагаемой ИС по сравнению с традиционным алгоритмом, который требует больше времени для достижения ТММ. Как показано, предлагаемый метод показывает очень высокую скорость отслеживания, незначительные колебания вокруг ТММ и более высокую эффективность по сравнению с другими методами.

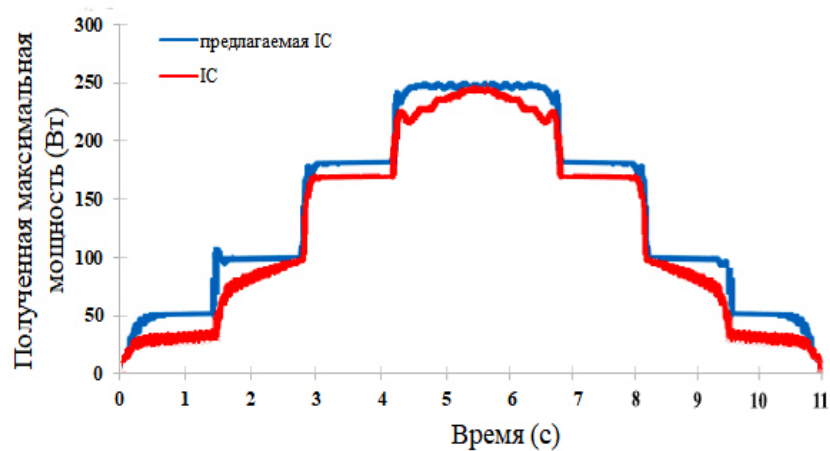


Рисунок 2.21. Результат моделирования предложенного и традиционного алгоритма ИП в условиях различных облучений для определения ТММ.

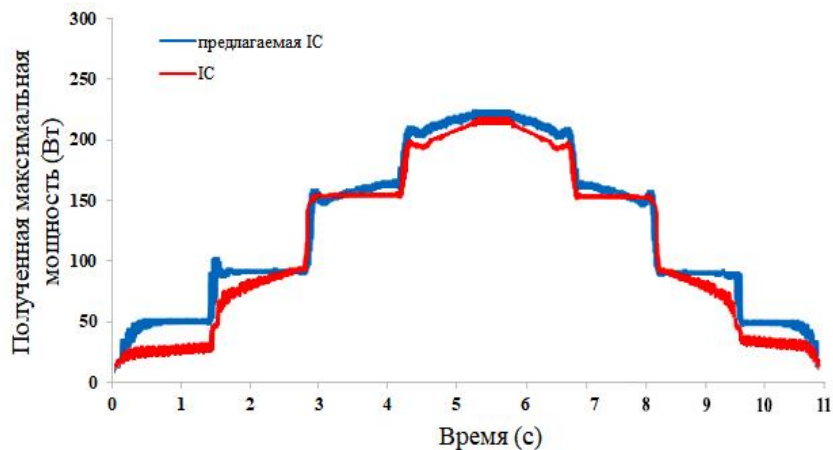


Рисунок 2.22 Результат моделирования предложенного и традиционного алгоритма ИП в условиях различных облучений и различной температуры для определения ТММ.

2.1.3.2 Результаты экспериментов

Вся система состоит из фотоэлектрической панели Delta BST 260-24P, контроллера PIC16F1789, повышающего преобразователя и нагрузки. Контроллер PIC16F1789 запрограммирован с использованием обычного алгоритма инкрементальной проводимости и предложенного для генерации подходящей широтно-импульсной модуляции, управляющей рабочим циклом. Результаты эксперимента были получены непосредственно в натуральных условиях 12 октября

2021 г. с (10 ч: 39 мин до 12 ч: 35 мин), как показано на осциллографе рисунок 2.23. В этот день солнечное излучение и температура окружающей среды составляют: $644,36 \text{ Вт/м}^2$; $19,4 \text{ }^\circ\text{C}$ в 10 ч 44 мин и $690,97 \text{ Вт/м}^2$; $22,56 \text{ }^\circ\text{C}$ в 12 ч 35 мин.

Результаты эксперимента были получены непосредственно в натуральных условиях 12 октября 2021 г. с (10 ч: 39 мин до 12 ч: 35 мин), как показано на осциллографе рисунок 2.23. В этот день солнечное излучение и температура окружающей среды составляют: $644,36 \text{ Вт/м}^2$; $19,4 \text{ }^\circ\text{C}$ в 10 ч 44 мин и $690,97 \text{ Вт/м}^2$; $22,56 \text{ }^\circ\text{C}$ в 12 ч 35 мин.

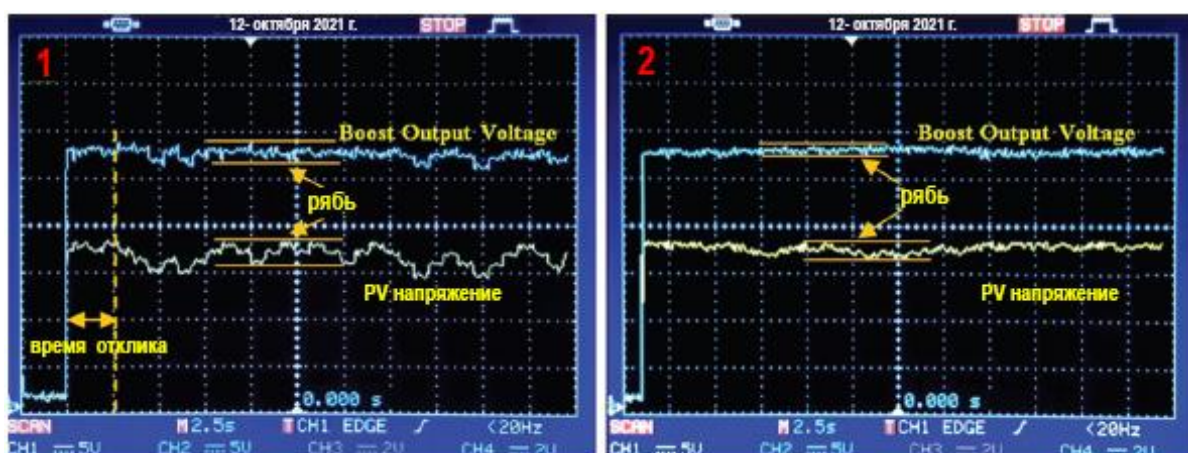


Рисунок 2.23 Экспериментальные результаты для напряжения PV
(1 - обычный алгоритм ИС, 2 -предложенный алгоритм ИС).

Экспериментальные результаты ясно показывают, что ожидаемые цели работы были достигнуты, также демонстрируют эффективность предложенного алгоритма ИП, а также показывают высокую скорость схождения к ТММ и уменьшение пульсаций. Эти улучшения видны на качестве напряжения на рисунке 2.23. Замечено, что время отклика традиционного алгоритма ИП слишком велико по сравнению с адаптивным рабочим циклом модифицированного алгоритма ИП, как показано на рисунке 2.24 а. Таким образом, предложение предлагает большее время отклика и меньше пульсаций напряжения. В результате предложенная методика позволяет уменьшить колебания вокруг ТММ. На рисунке 2.24 б. предложение допускает меньшие пульсации тока по сравнению с традиционной технологией ИП.

Это демонстрирует эффективность предложенного алгоритма, позволяющего снизить потери энергии. Преимущества превосходства модифицированного метода по стабильности и достаточно быстрому достижению ТММ подтверждаются анализом рисунка 2.25. Таким образом, использование адаптивного рабочего цикла преобразователя обеспечивает более быструю сходимость к целевому ТММ с меньшей ошибкой относительно предоставленной фотоэлектрической мощности.

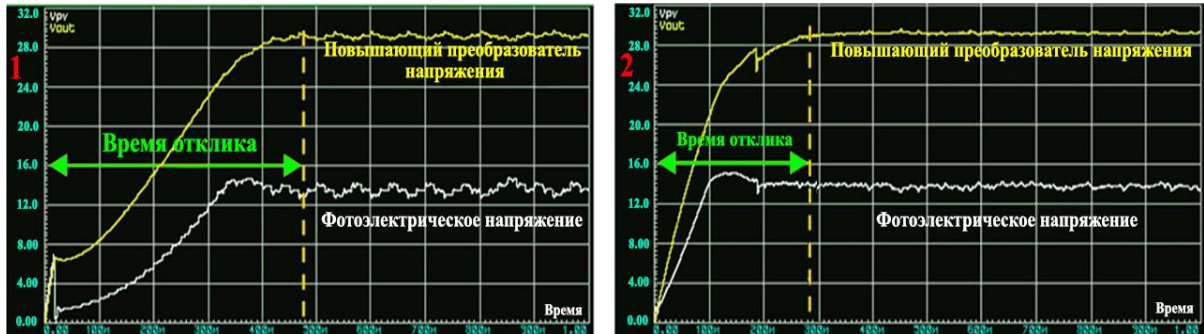
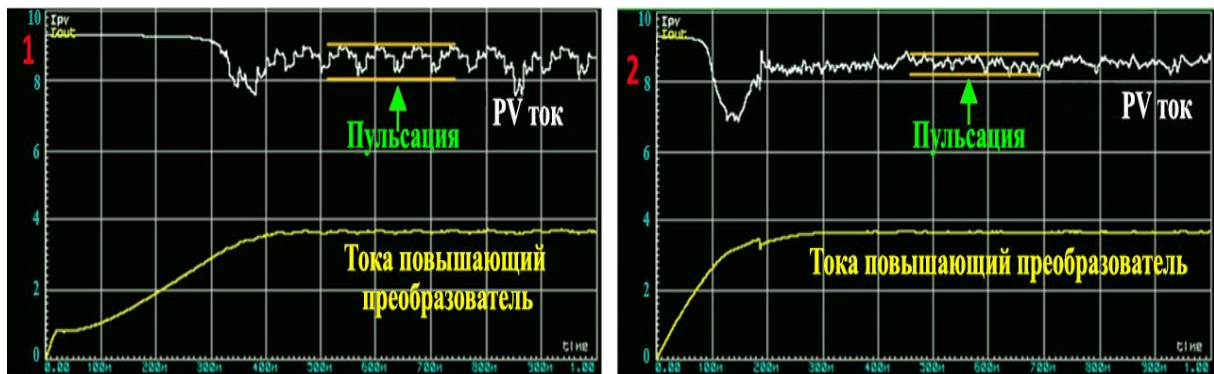


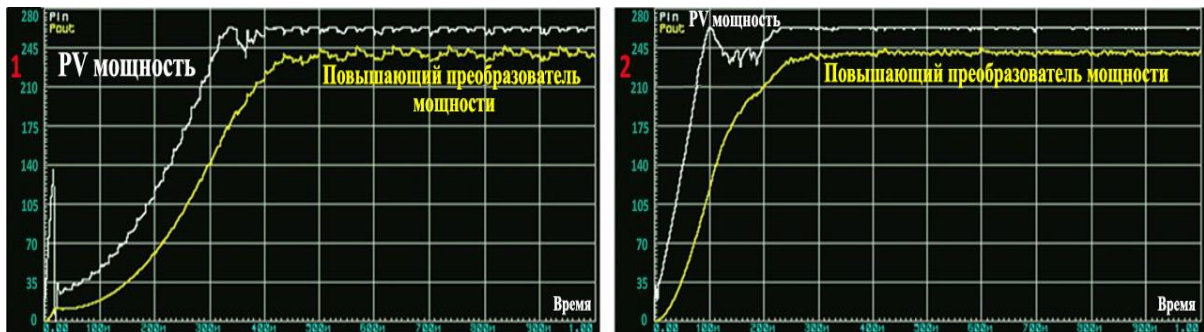
Рисунок 2.24 а. Фотоэлектрическое напряжение и повышающее напряжение:

(1) традиционный метод ИП, (2) модифицированный метод ИП.



Рисунки 2.24 б. Фотоэлектрический ток и ток повышающего преобразователя:

традиционный метод ИП, (2) модифицированный метод ИП.



Рисунки 2.25. Мощность фотоэлектрических модулей и мощность повышающего преобразователя: (1) традиционная технология ИП, (2) модифицированная технология ИП.

2.1.4 Производительность улучшенного алгоритма инкрементной проводимости для фотоэлектрической системы в условиях частичного затенения

Солнечные батареи часто подвергаются частичному затенению и загрязнению, что является основной причиной снижения и несоответствия выходной мощности. В этих условиях кривые PV массива отличаются появлением многочисленных локальных пиков, которые вызваны активацией обходных диодов, экранирующих затененные ячейки. Стандартные алгоритмы ТММ могут потерпеть неудачу в таких условиях частичного затенения из-за сходимости к локальному максимуму, а не к глобальному максимуму, что приведет к значительной потере выходной мощности и, как следствие, к неудовлетворительному или низкому общему выходу системы.

Производительность модифицированного алгоритма ТММ с инкрементной проводимостью в условиях частичного затенения. В условиях частичного затенения проводится сравнение между предлагаемыми традиционными и модифицированными алгоритмами ТММ с инкрементной проводимостью.

Модифицированная методика ИП ТММ была испытана в условиях частичного затенения, фотоэлектрические модули соединены с обходным диодом последовательно с каждым модулем, соединенным шунтом. В первом случае оба модуля работают в нормальных условиях (при 1000 Вт/м^2 , 25°C), затем при $t=0,25$ с частично затеняется один модуль, работающий при 700 Вт/м^2 .

В идеале общая максимальная мощность фотоэлектрических модулей составляет 260 Вт, при частичном затенении; максимальная мощность фотоэлектрических модулей снижена до 185 Вт. При сравнении традиционных и

модифицированных методов ТММ в предыдущих условиях результаты приведены на рисунках 2.26, 2.27.

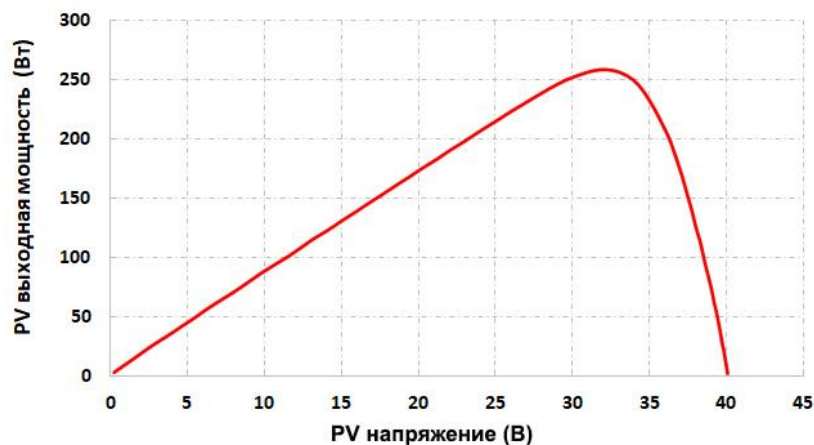


Рисунок 2.26 Кривая P–V фотоэлектрической системы в случае стандартных условий.

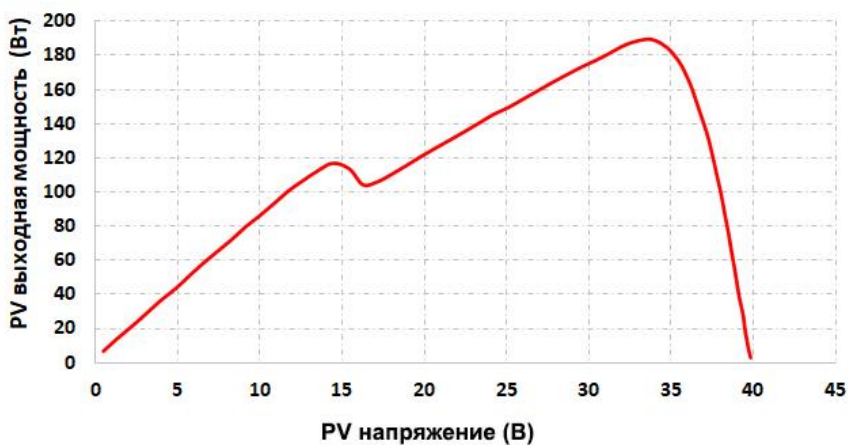


Рисунок 2.27 Кривая P – V фотоэлектрической системы в условиях частичного затенения.

Согласно рис.2.28, в условиях нормального и частичного затенения, традиционный метод ТММ демонстрирует высокие установившиеся колебания мощности с эффективностью отслеживания 94 % и 91,5 % соответственно. Кроме того, время установления составляет 0,02 секунды во время изменения.

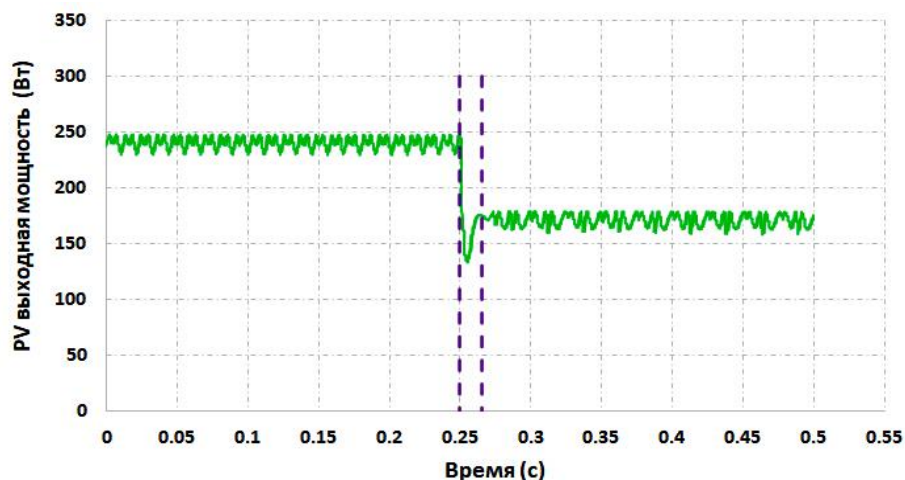


Рисунок 2.28. Производительность отслеживания ТММ в случае частичного затенения с помощью обычного логарифмирования ИП

В то время как на рисунке 2.29 показан более быстрый отклик модифицированного метода ТММ с временем установления 0,01 с и уменьшенными потерями мощности PV. Кроме того, он устраняет нестационарные колебания мощности фотоэлектрической системы и показывает более точные результаты и более высокую отслеживаемую мощность фотоэлектрической системы. Этот результат значительно улучшил эффективность отслеживания 98,5% и 93,6% в условиях нормального и частичного затенения соответственно.

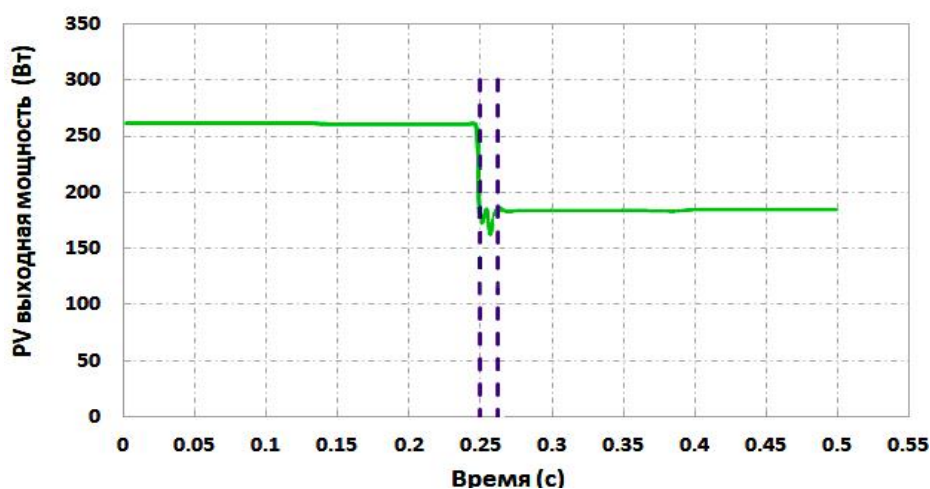


Рисунок 2.29. Производительность отслеживания ТММ в случае частичного затенения с помощью модифицированного логарифма ИП

Полученные данные показывают, что в отличие от традиционного алгоритма инкрементной проводимости, предложенный новый алгоритм может точно отслеживать ТММ в различных условиях частичного затенения и реагировать быстрее. В результате эффективность инновационного алгоритма, предложенного в условиях частичного затенения, высока.

2.2 Математическое моделирование работы ветроэлектрической установки

Как было пояснено в первой главе раздела 1.2, энергия, преобразовываемая ветровыми турбинами, зависит от нескольких факторов, наиболее важными из которых являются диаметр ротора, скорость ветра и высота турбины [90,91,92]. Всякий раз, когда скорость ветра увеличивается, энергия, вырабатываемая турбинами, увеличивается, а также, когда диаметр ротора увеличивается, энергия, вырабатываемая ветряной турбиной, увеличивается. Процесс моделирования ветряной турбины был выполнен с использованием среды Matlab, как показано на рисунке 2.30, и с использованием математических уравнений, показанных в разделе 1.2, и следующих уравнений.

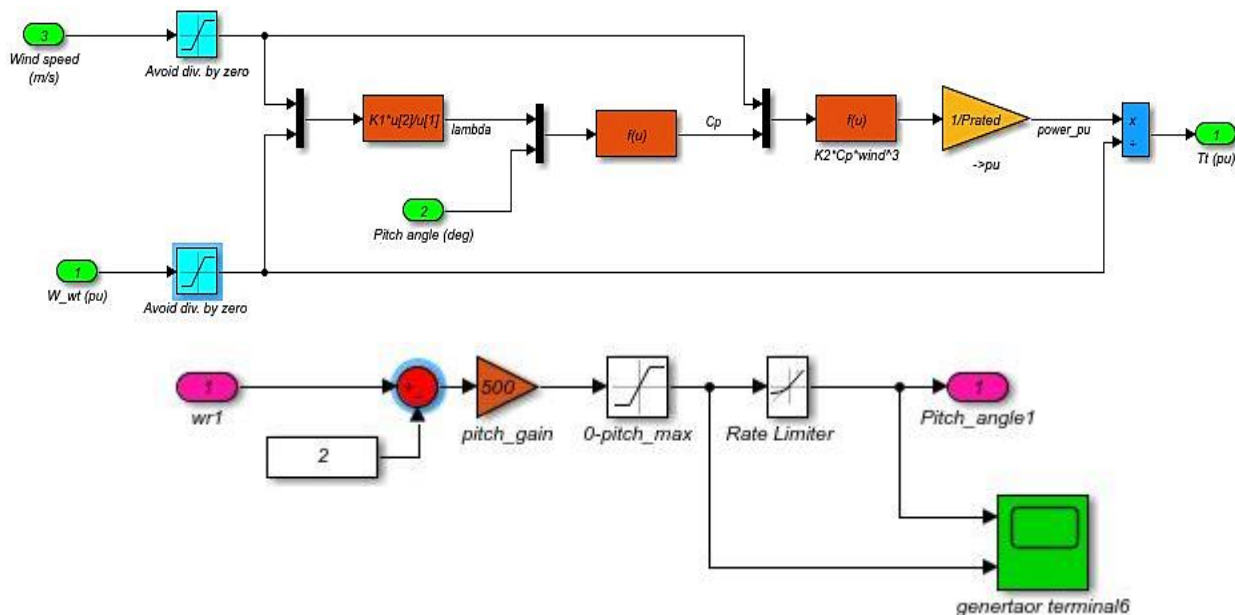


Рисунок 2.30. Подсистема реализации обобщенной модели ветряной турбины

2.2.1 Модель преобразования ветровой энергии и ветрогенераторной системы СГПМ

Схема преобразования состоит из турбины с переменным шагом, подключенной к СГПМ, необходимо установить силовые электронные устройства между генератором ветряной турбины и сетью, чтобы улавливать максимальную энергию ветра, где частота постоянна, как показано на рисунке 2.31 [93].

Мощность, вырабатываемая ветряной турбиной, определяется по формуле:

$$P_B = 0,5 * A \rho v_B^3 \quad (2.42)$$

механическая мощность, захваченная ветряной турбиной

$$P_T = 0,5 * \rho \pi R^2 C_p (\gamma, \theta_{pitch}) v_{eq}^3 \quad (2.43)$$

$W_{rotor} = (\gamma) \cdot (v_{eq} / R)$ – скорость вращения ротора [17].

Аэродинамический крутящий момент определяется как

$$T_r = \frac{P_t}{W_{rotor}} = \frac{\frac{1}{2} (\rho \pi R^2 (v_{eq})^3 C_p (\lambda, \theta_{pitch}))}{(\gamma) \left(\frac{v_{eq}}{R} \right)} \quad (2.44)$$

Плотность воздуха ρ зависит от температуры и давления воздуха. Безразмерный коэффициент мощности $C_p (\lambda, \theta_{pitch})$ представляет эффективность ротора турбины [94]. Этот коэффициент зависит от отношения скорости ветрового потока и линейной скорости вращения конца лопасти (коэффициента быстроходности). Выражается как $\gamma = W_{rotor} R / v_{eq}$, угол установки лопасти θ_{pitch} , W_{rotor} обозначает скорость ротора. Для турбины с постоянной скоростью коэффициент мощности уменьшается, когда скорость ветра v_{eq} увеличивается (λ мала). Этот факт используется в пассивной ветровой турбине [95,96].

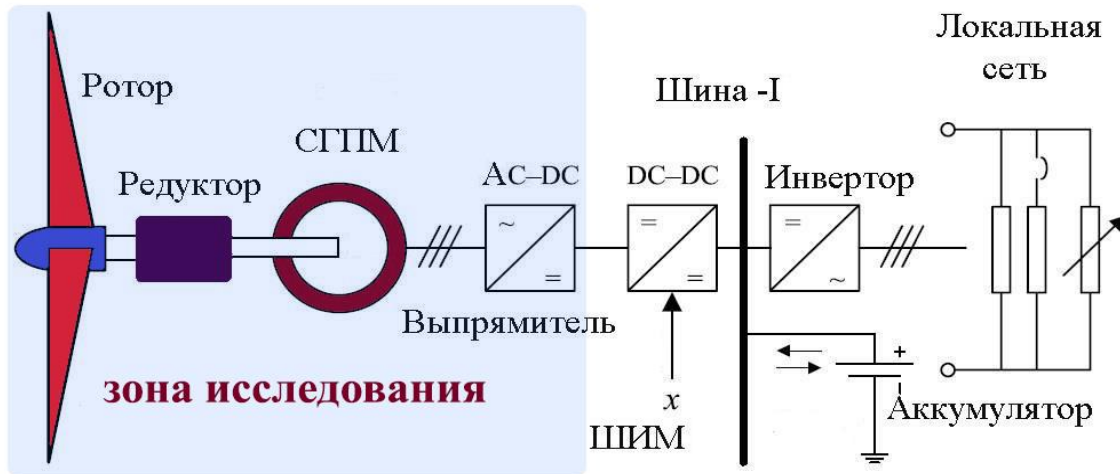


Рисунок 2.31. Подсистема реализации обобщенной модели ветряной турбины

2.2.2 Повышение эффективности работы ветровой турбины за счет использования метода отбора максимальной мощности (ТММ)

2.2.2.1 Контроль соотношения скорости конца лопасти и коэффициента использования мощности

Из рисунка 1.14 видно, что оптимальное соотношение скорости конца лопасти составляет $\gamma = 8,1$ и максимальный коэффициент использования мощности $C_{p \text{ макс.}} = 0,48$.

$$W_{\text{оптим.}} = \frac{\gamma_{\text{оптим.}} \cdot R}{v_B} \quad (2.45)$$

$$\gamma = \frac{W_{\text{ротор}} \cdot R}{v_B} \quad (2.46)$$

$$C_p(\gamma, \beta) = 0,5176 \left(\frac{116}{\gamma_i} - 0,4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\gamma_i}} + 0,0068\gamma \quad (2.47)$$

$$\frac{1}{\gamma_i} = \frac{1}{\gamma + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad (2.48)$$

Получаемый от ветра, коэффициент мощности (уравнение (2.47) должен поддерживаться на оптимальном значении [96].

$$\frac{d}{d\gamma} C_p(\gamma, \beta) \Big|_{\gamma=\gamma_{\text{опт}}} = 0 \quad (2.49)$$

где

$$C_{p\text{Max}}(\gamma_{\text{опт}}, \beta) = \text{Max} [C_{p\text{Max}}(\gamma, \beta)] \quad (2.50)$$

где C_p — коэффициент мощности турбины, представляющий КПД ветровой турбины обозначены, как на рисунке 2.32, β — угол наклона, а γ — коэффициент скорости наконечника, представляющее состояние турбины при различных скоростях ветра [97,98].

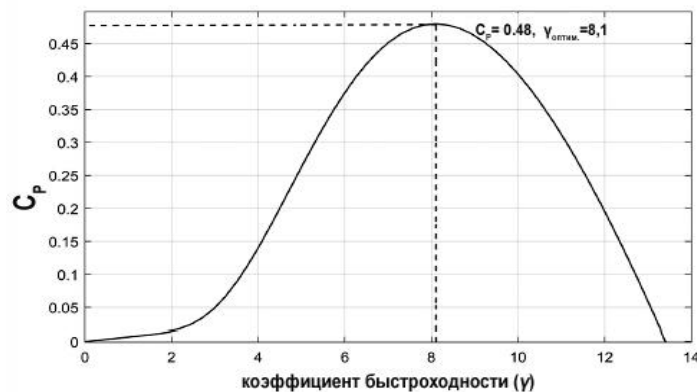


Рисунок 2.32. Кривая коэффициента мощности.

2.2.2.2 Метод возмущения и наблюдения (P&O) для ветровых турбин

Метод возмущения и наблюдения (P&O) представляет собой метод математической оптимизации, используемый для поиска точки локального максимума определенной функции. Метод P&O не требует каких-либо предварительных знаний о ветровой турбине, что означает, что генератор в этом методе работает независимо от характеристик турбины. Кроме того, метод P&O имеет некоторые преимущества, такие как низкая стоимость, простота применения, и его можно значительно использовать для систем преобразования энергии ветра, которые имеют средние и малые размеры [99,100].

Этот метод представляет собой алгоритм, который непрерывно ищет точку пиковой мощности. Он основан на рассмотрении изменения мощности как

скорости, а также зависит от мгновенного измерения мощности и сравнения с предыдущим значением мощности, анализируется $dP/d\omega_m$. $dP/d\omega_m = 0$ означает, что достигнута точка максимальной мощности. Однако эффективность и скорость сходимости могут ухудшаться в методах Р&О, потому что размер шага обычно не может быть установлен правильно и точно. Алгоритм Р&О показан на рисунке 2.33.

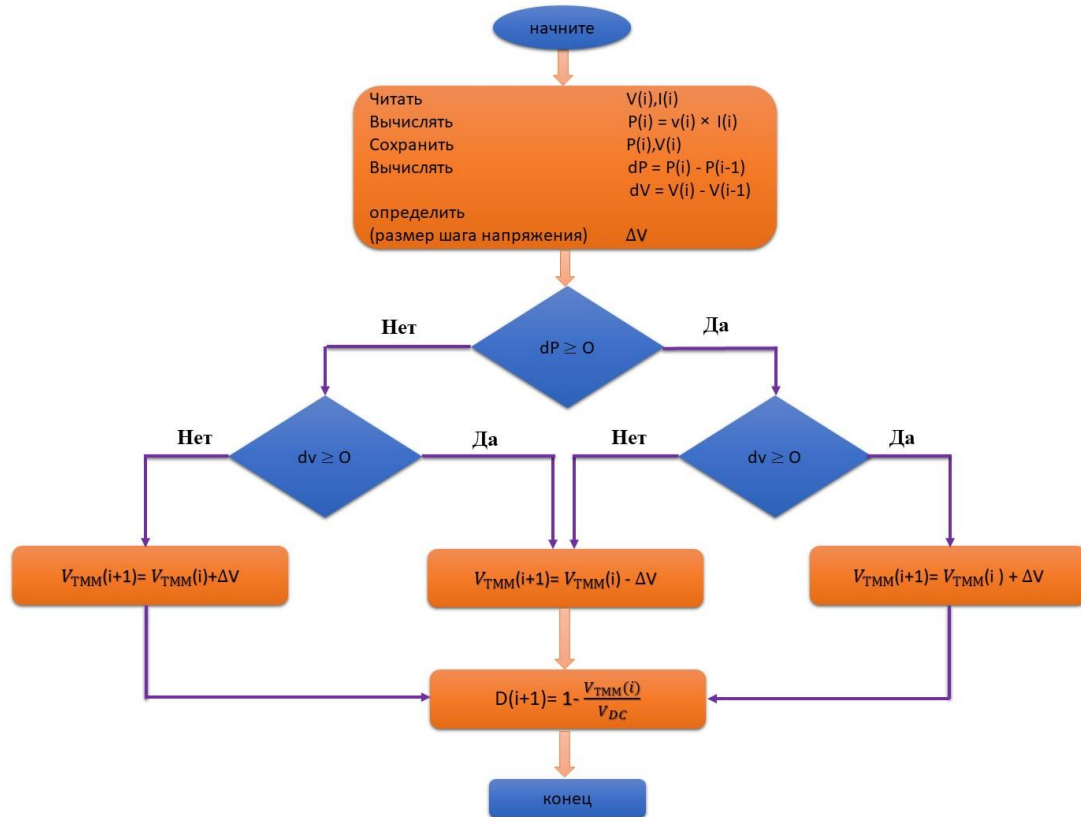


Рисунок 2.33. Структурная схема алгоритма метода "Возмущение и наблюдение" для ветротурбины

2.2.2.3 Разработка метода управления углом тангажа

Регулирование угла наклона лопастей является основным подходом к управлению скоростью вращения ветряных турбин, видно, что это полезный и хороший метод защиты ветряной турбины от сверхвысокой мощности и обеспечения непрерывности производства энергии за счет снижения мощности до номинальной (см. зону с) на рисунке 2.34 [101]. Когда скорость ветра превышает

номинальную скорость, мощность превышает ее номинальное значение. Чтобы ограничить это увеличение, значение коэффициента мощности C_p должно быть уменьшено путем увеличения значения угла наклона β таким образом, чтобы ограничить мощность при постоянном номинальном значении мощности. Таким образом, энергия все еще может быть получена [102-103].

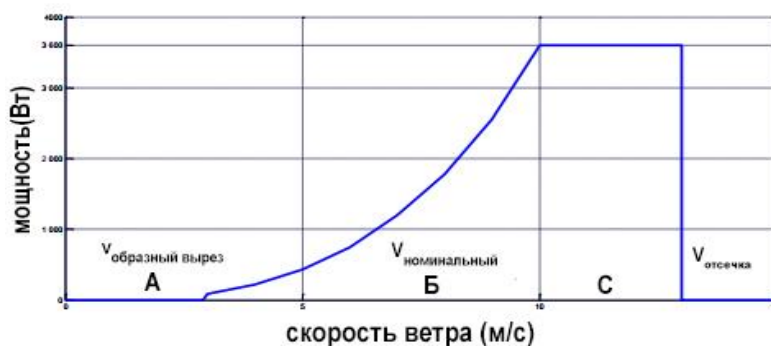


Рисунок 2.34. Мощностная характеристика ветроустановки

2.2.2.4 Предлагаемый метод ТММ

Предложен следующий метод, использующий метод Р&О с методом отношения скорости наконечника (TSR коэффициент быстроходности). В результате был получен новый логарифм, который показан на рисунке 2.35. новый логарифмический механизм управления ветряной турбиной обеспечивает плавное управление турбиной в любых условиях.

Для подтверждения достоверности предложенного метода ТММ было проведено моделирование с использованием среды Matlab для ветровой турбины мощностью 1,6 кВт. Характеристики ветряной турбины, используемой в имитационном модели, описаны в таблице 2.3.

Таблица 2.3: Основные технические параметры

Параметр	ВЭВТ 1,6 кВт
Диаметр ветротурбины, м	3
Количество лопастей	9

Высота лопасти, м	0,5
Номинальное число оборотов ротора	100 -120
Стартовая скорость ветра, м/сек	1,7 - 2
Расчетная скорость ветра при номинальной мощности, м/сек	7,5
Максимально допустимая скорость ветра, м/с	24
Масса ВЭС, кг ориентировочно	800
Коэффициент использования силы ветра	Более 0,42
Тип генератора	3фазы, на пост. Магнитах
Номинальное напряжение генератора, В	100
Частота генератора, Гц	50

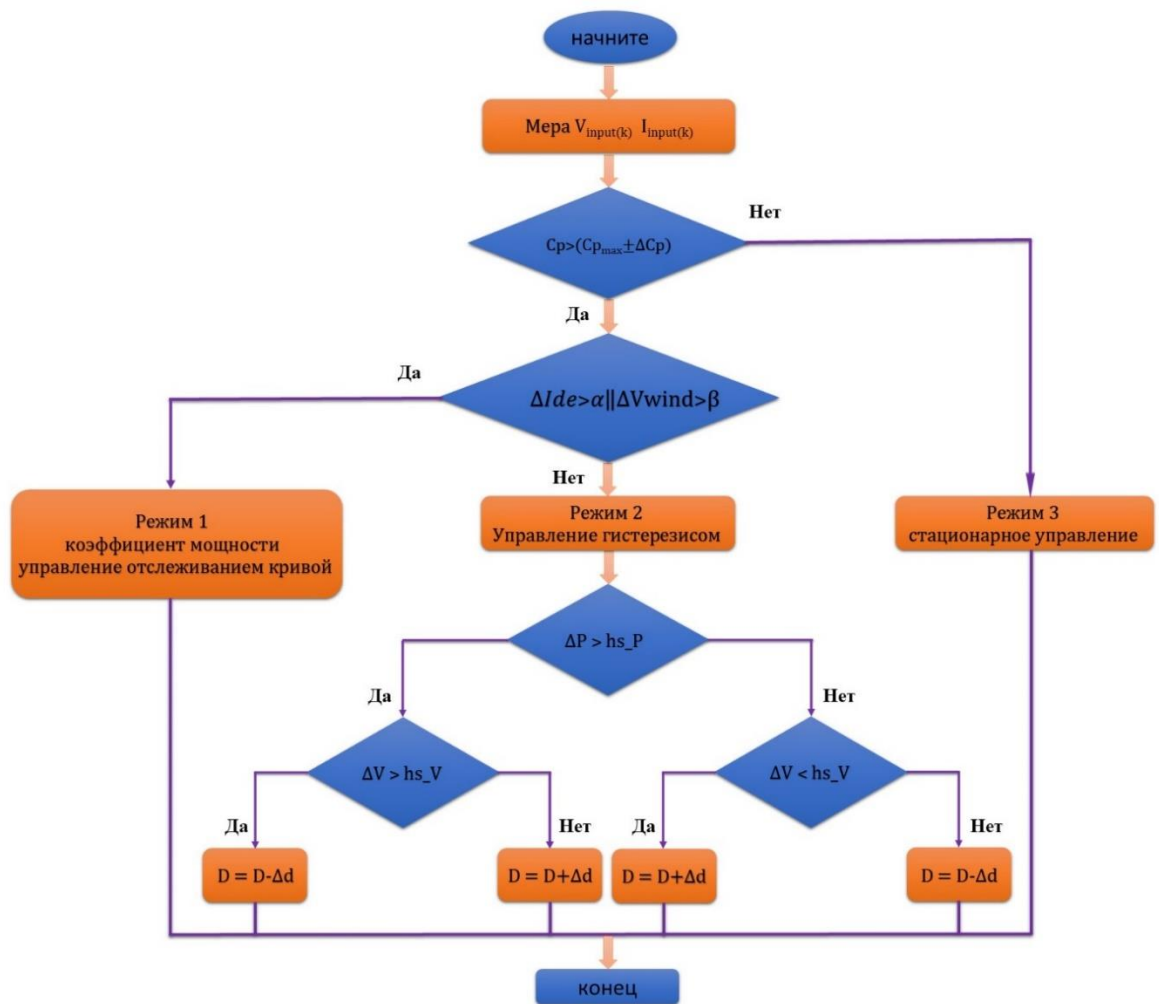
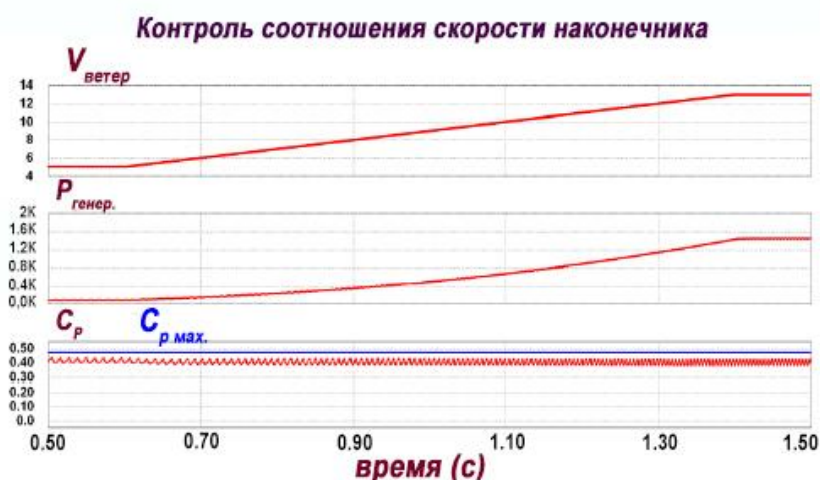


Рисунок 2.35. Предлагаемый алгоритм

Динамические характеристики каждого контроллера показаны на рисунке 2.36. C_p резко падают, потому что метод Р&О не может отслеживать изменения скорости ветра, как это произошло при увеличении скорости ветра с 0,6 с до 1,4 с. С другой стороны, первый метод ТММ (управление отношением скорости наконечника) может улавливать C_p , непрерывно следуя кривой C_p . В этом случае предлагаемое управление работает по методике модели 1, что дает системе быструю динамическую реакцию на изменение скорости ветра.

Рабочие характеристики каждого контроллера в установившемся режиме с нескорректированными кривыми C_p были описаны на рисунке 2.37. Выходная мощность ветровой турбины соответствует неправильной кривой C_p в случае метода управления передаточным отношением скорости вращения. В то же время метод Р&О сравнивает предыдущую выходную мощность с последующей выходной мощностью, чтобы отследить оптимальную точку мощности. Теперь ясно, что техника Р&О имеет слабость в рабочей точке, которая качается вверх и вниз. Таким образом, режимы 2 и 3 в предлагаемом гибридном способе управления будут работать.



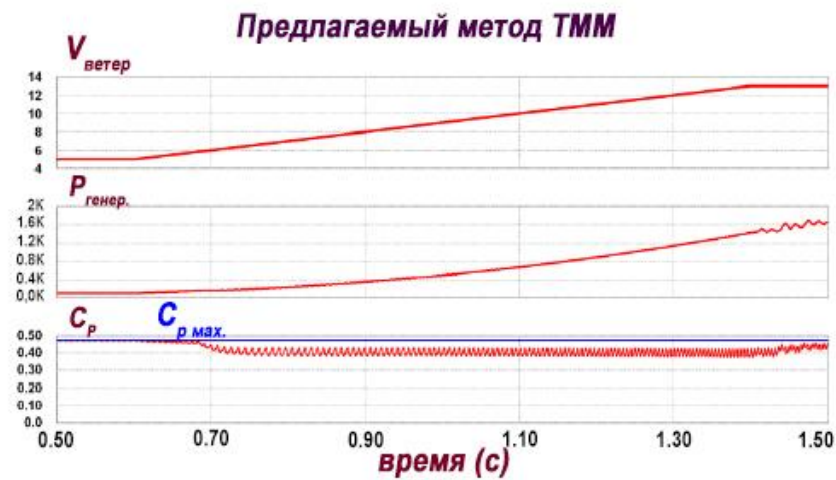
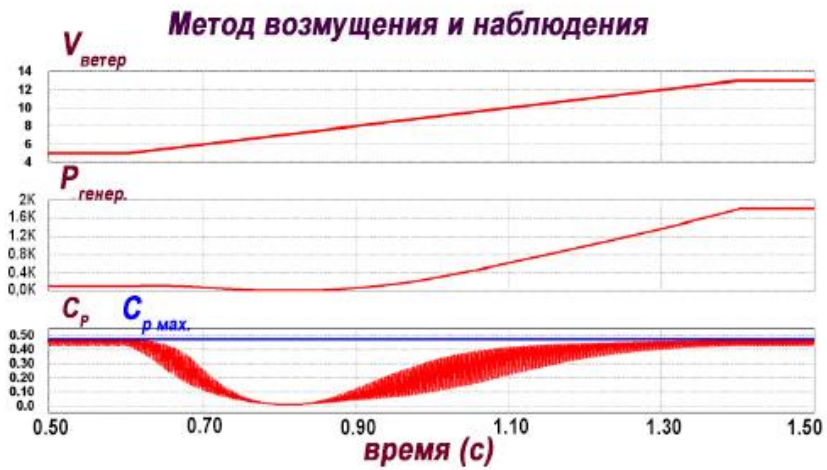
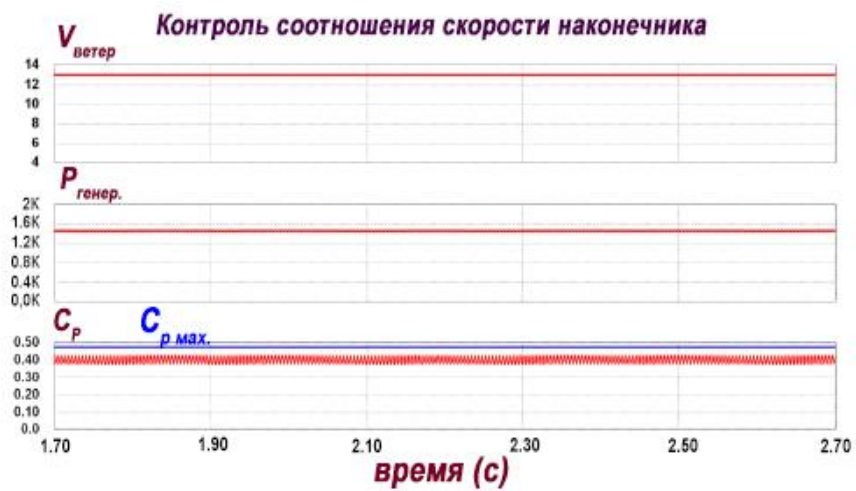


Рисунок 2.36. Сравнительные характеристики производительности, полученные методом ТММ.



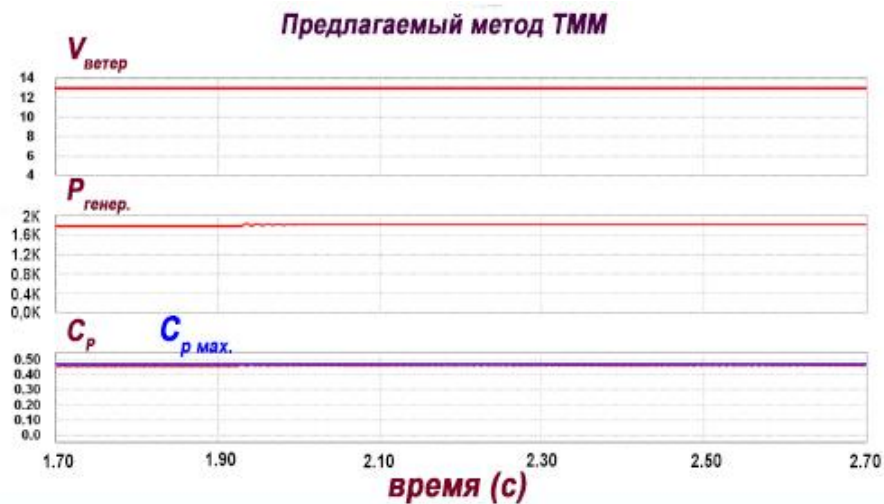
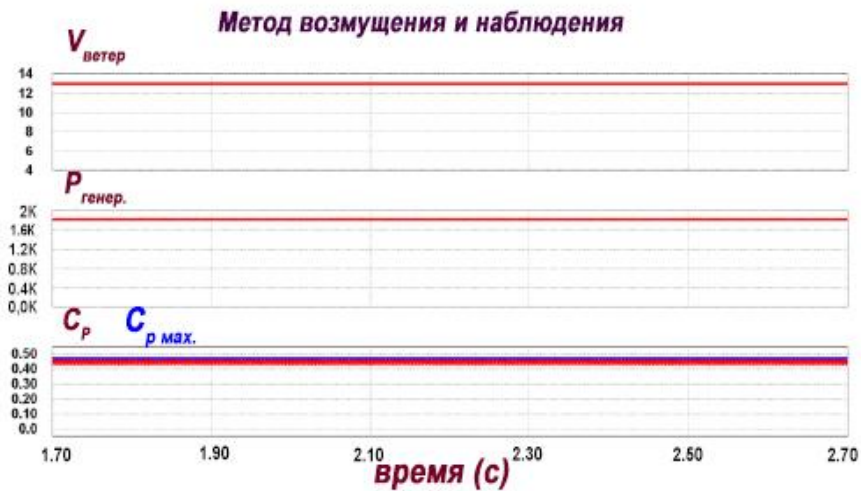


Рисунок 2.37. Производительность стационарного режима с каждым методом ТММ в качестве примера сравнения

2.3 Математическое моделирование работы аккумуляторных систем

На основе математических уравнений, объясненных в разделе 1.3, и приведенных ниже уравнений, литий-ионная батарея была реализована с использованием среды Matlab в этой диссертации, как показано на рисунке 2.38, который показывает характер работы батареи в Matlab.

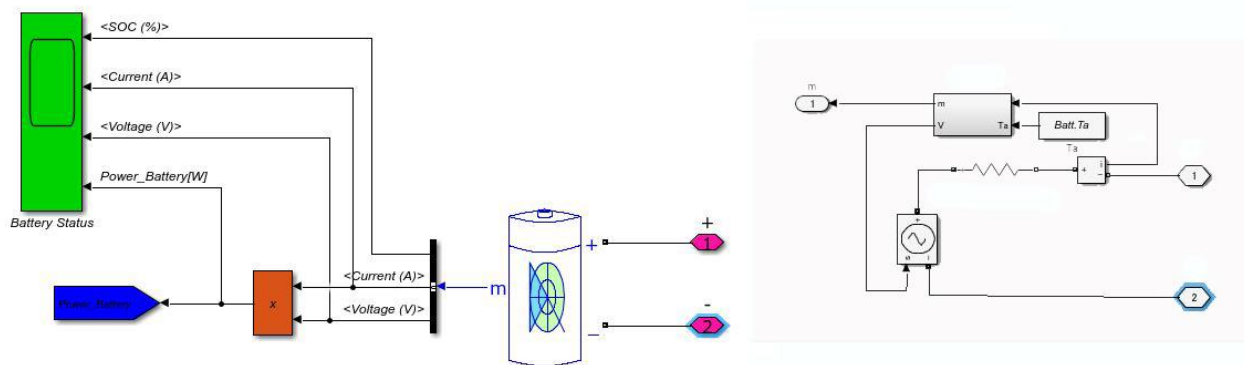


Рисунок 2.38. Модель Simulink аккумулятора в Matlab.

Очень легко применить литий-ионный аккумулятор в среде Matlab, используя параметры аккумулятора от производителя или используя кривую аккумулятора (зарядка или разрядка), также от компании-производителя аккумулятора как на рисунке 2.38.

Чтобы определить накопление энергии, следует определить резервные дни P_D , а также количество потребляемой энергии в день $E_{L,max}$ (Вт,ч/день), как показано ниже.

$$E_S = E_{L,max} \cdot P_D \quad (2.51)$$

$$TOS = \frac{E_S}{DOD} = \frac{E_{L,max} \cdot P_D}{DOD} \quad (2.52)$$

где DOD - глубина разгрузки, TOS - температура окружающей среды

Из уравнения 2.52 можно получить минимальную емкость аккумулятора, используя коэффициент (ТК):

$$Q_{бат.,мин.} = \frac{TOS \cdot ТК}{N_M \cdot \eta_{бат.}} \quad (Втч) \quad (2.53)$$

где:

$Q_{бат.,мин.}$ - Минимальная емкость аккумулятора

ТК - Температурный коэффициент

$\eta_{бат.}$ - Эффективность работы аккумулятора (КПД батареи)

Отсюда получаем $Q_{\text{бат.,мин.}}$ минимальную емкость (Ач) аккумуляторной батареи, разделив минимальную емкость аккумуляторной батареи на $V_{\text{бат.}}$ (напряжение батареи).

$$Q_{\text{бат.,мин.}} = \frac{C_{\text{бат.,мин.}} (\text{Втч})}{V_{\text{бат.}}} \quad (\text{Ач}) \quad (2.54)$$

Ёмкость аккумуляторной батареи можно записать в виде следующего уравнения:

$$Q_{\text{бат.,мин.}} = \frac{E_{\text{L,макс.}} N_j P_D}{V_{\text{бат.}} DOD N_M \eta_{\text{бат.}}} \quad (\text{Ач}) \quad (2.55)$$

где:

$V_{\text{бат.}}$ - напряжение батареи

N_M — количество дней в месяце с максимальным потреблением энергии.

По емкости блока батарей $Q_{\text{бат.,u}}$ можно определить количество используемых батарей:

$$N_{\text{бат.}} = \text{ENT} \left[\frac{Q_{\text{бат.,мин.}}}{Q_{\text{бат.,мин.}}} \right] \quad (2.56)$$

где ENT - целое значение.

Очень важно знать батарею SOS для всех случаев, таких как разрядка, время зарядки, начальная и конечная точки, как показано в уравнении [104,105].

$$SOS = SOS_0 \left[1 - \frac{\sigma}{24} (t - t_0) \right] + \int_{t_0}^t \left(\frac{I_{\text{бат.}} * \eta_{\text{бат.}}}{Q_{\text{бат.}}} \right) d\varphi \quad (2.57)$$

где t и t_0 - это время, представляющее интерес, и время начальной точки (час); SOC_0 - состояние заряда батареи в начальной точке; $I_{\text{бат.}}$ - ток батареи А; σ - скорость саморазряда, которая зависит от состояния работоспособности батареи и накопленного заряда, и 0,2% - рекомендуемое значение в день, которое рекомендуется; $Q_{\text{бат.}}$ - емкость батареи; $\eta_{\text{бат.}}$ - эффективность разрядки и зарядки батареи(КПД). Рекомендуемая эффективность, используемая для этапа разрядки,

составляет 100%, а для процесса зарядки используем среднее приближение 90%, чтобы отразить тот факт, что накопленная энергия на самом деле составляет лишь малую часть потребляемой энергии.

Для расчета общего тока батареи для гибридной солнечно-ветровой системы, состоящей из солнечной панели и ветряной турбины, подключенной к батарее, которая обеспечивает потребляемый ток нагрузки, можно описать уравнением:

$$I_{\text{бат.}} = \frac{P_{WT} + P_{PV} - P_{AC \text{ нагрузка}} / \eta_{\text{бат.}} - P_{DC \text{ нагрузка}}}{E_{\text{бат.}}} \quad (2.58)$$

В итоге можно описать мощность ветряной турбины с P_{wt} , массива фотоэлектрических модулей с P_{pv} и мощность нагрузки $P_{\text{нагрузка}}$, которая измеряется в ваттах.

В этом исследовании, η - КПД инвертора, равный 94% в соответствии со спецификациями инвертора.

При влиянии температуры на состояние заряда и разряда, можно видеть, что разрядка или зарядка используются для выражения отношения между номинальной емкостью батареи и током заряда или разряда. На рисунках 2.39 и 2.40 показано изменение состояния заряда и состояния разрядки в зависимости от емкости аккумулятора соответственно [106,107].

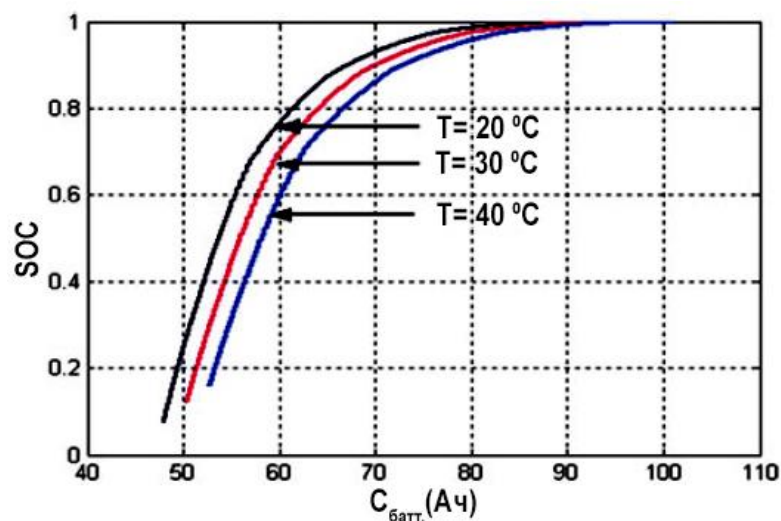


Рисунок 2.39. Влияние температуры на заряженное состояние аккумулятора.

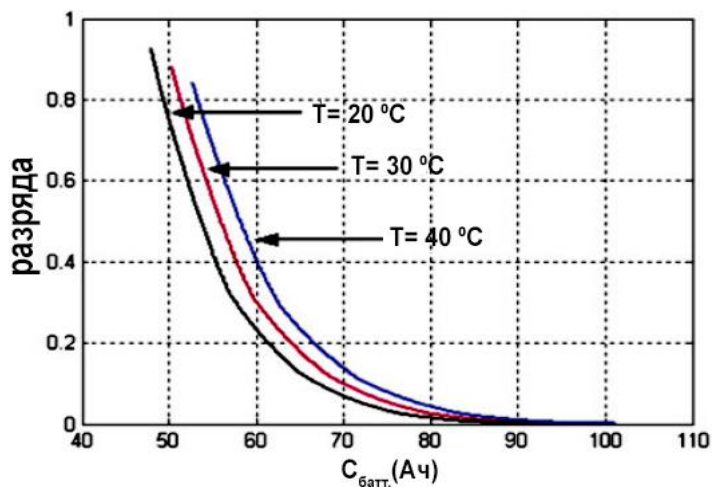


Рисунок 2.40. Влияние температуры на разряженное состояние аккумулятора.

Можно описать процесс разряда для системы накопления энергии аккумулятора, как показано на рисунке 2.41.

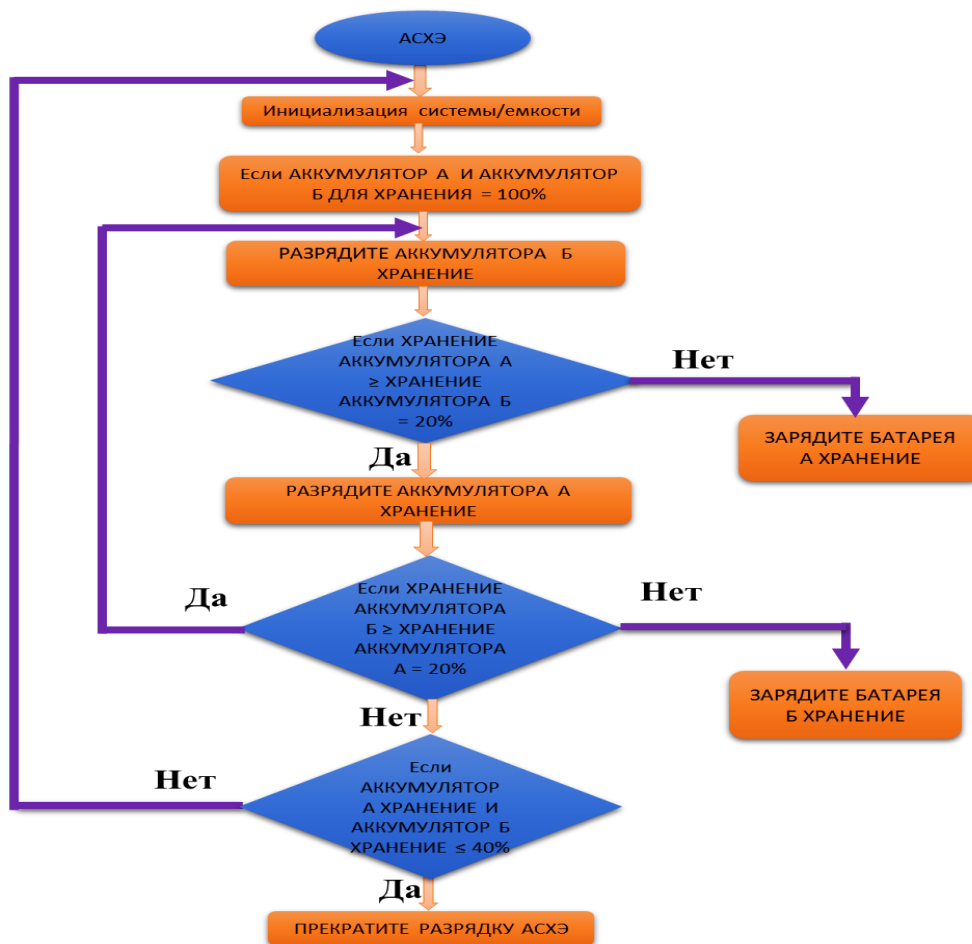


Рисунок 2.41. Алгоритм работы системы разрядки аккумулятора

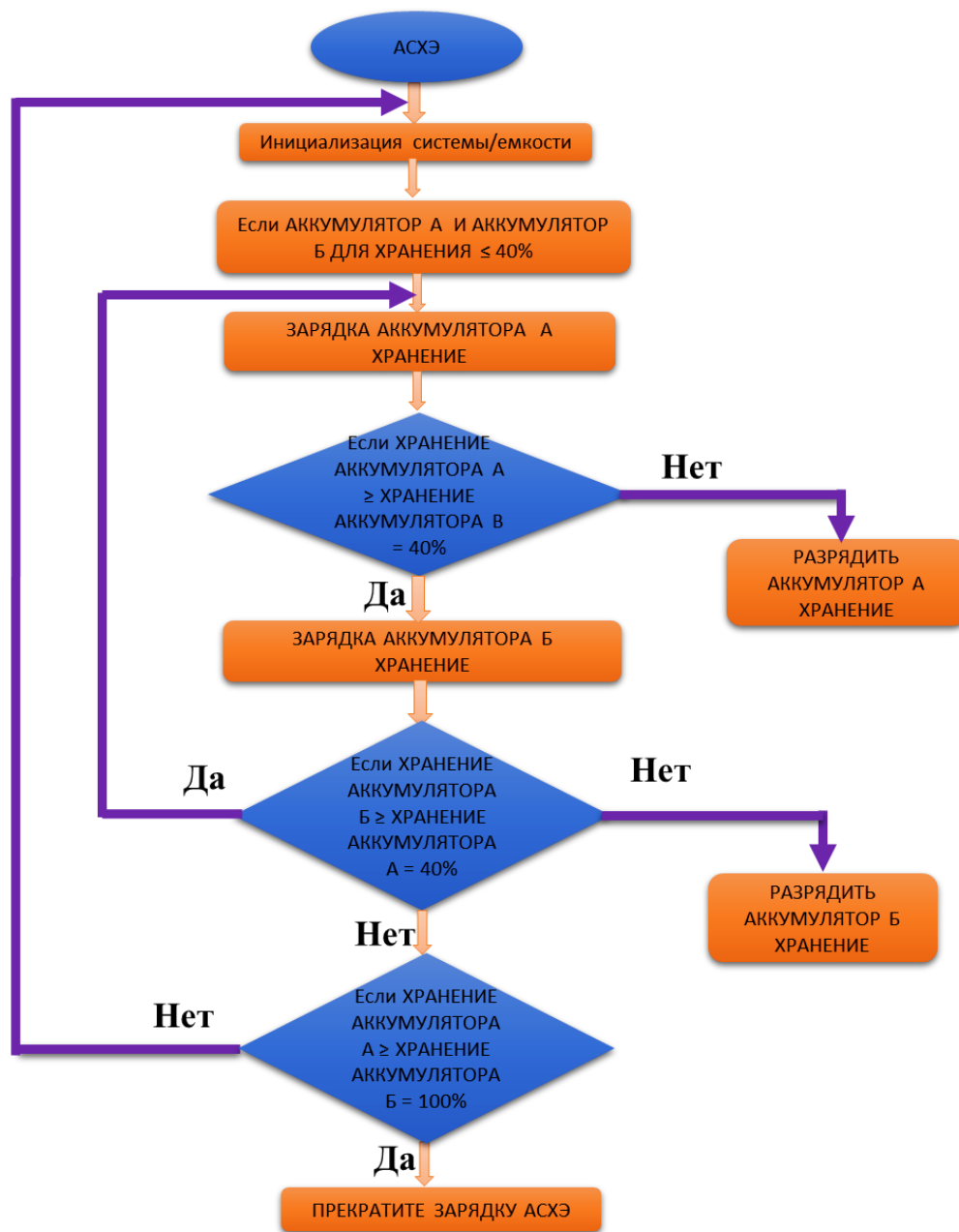


Рисунок 2.42. Алгоритм работы системы зарядки аккумулятора

Рисунок 2.42 объясняет алгоритм системы накопления энергии аккумулятора и описывает процесс зарядки в предлагаемой системе.

2.4 Теория принятия решений для гибридных ветро-солнечных систем

Гибридная ветро-солнечная энергетическая система собирает энергию, вырабатываемую солнечными панелями и ветряными турбинами. Она также имеет аккумулятор для хранения дополнительной произведенной энергии.

Срок службы и емкость батареи, используемой в системе, играют важную роль в определении эффективности гибридных фотоэлектрических и ветряных батарей. Неравномерная зарядка и разрядка аккумулятора сокращают срок службы аккумулятора и его емкость. Кроме того, низкое потребление энергии и система управления стали необходимым требованием для гибридных ветро-солнечных систем. Экологические и климатические факторы, такие как скорость ветра, температура и солнечная радиация, постоянно меняются в различных районах. Так, для различных регионов, автономные фотоэлектрические модули или ветроэнергетические системы длительное время в течение года не вырабатывают полезной энергии. Поэтому очень важно решить, сколько солнечных батарей, ветряных турбин и батарей использовать. Оптимальный размер может помочь обеспечить наименьшие инвестиции и поддерживать наименьшие расходы за счет разумного и адекватного использования гибридной ветро-солнечной системы.

Наиболее эффективной технологией энергоснабжения жилого сектора и удаленной сельской местности можно считать технологию возобновляемой энергетики.



Рисунок 2.43. Схема гибридной ветро-солнечной электростанции

Следующая оптимизационная модель представляет собой инструмент моделирования для получения оптимального размера или оптимальной конфигурации гибридной солнечно-ветровой системы, в которой используется аккумуляторная батарея. Был разработан контроллер, показанный на рисунке 2.43. Система разработана таким образом, чтобы максимально обеспечить использование солнечной и ветровой энергии. Разработанная система работала как в автономных, так и в сетевых регионах, а именно в сельской местности, где смысловая подача электроэнергии не является непрерывной, и есть много перебоев или доступность электроэнергии очень низкая, поэтому в этой работе в основном использовались возобновляемые источники энергии, а не национальные линии электросети, что означает использование солнечной и ветровой энергии без национальной сети. Если в какой-то период времени ни ветер, ни солнечная энергия недоступны, используются батареи А и Б, которые заряжаются от этих

энергоресурсов, а затем используется национальная сеть, если батареи были разряжены.

В этой системе отдано первенство ветровой турбине, как видно из блок-схемы рисунка 2.44. Если энергия ветра превышает 3,5 м/с, будет заряжаться аккумуляторная батарея А, что позволит подавать переменный или постоянный ток. Панель солнечной энергии используется, если энергия ветра меньше 3,5 м/с. В этом случае выходная мощность солнечной батареи рассчитывается в соответствии с моделью фотоэлектрической системы с использованием характеристик фотоэлектрического модуля, а также температуры окружающего воздуха и условий солнечного излучения. Необходимо проверить, достаточно ли излучение удовлетворительно для производства энергии или нет. Если нет, то используется энергосистема и проверяется, доступна ли электросеть или нет. Если сеть доступна, энергия берётся из сети, а если нет, то снова проверяется, достаточно ли заряжена батарея А для производства электроэнергии. Если аккумулятор А достаточно заряжен, мы будем получать энергию от него, а если нет, то мы будем получать энергию от аккумулятора Б, который был заряжен солнечной панелью. Аккумуляторный блок общей номинальной емкостью $C_{\text{бат.}}$ (Ач) допускается разряжать до предела, определяемого максимальной глубиной разряда, которая указывается разработчиком системы в начале.

В этом случае следует иметь в виду, что блок батарей Б предназначен для экстренных случаев. Затем используется блок батарей Б, если батарея А не может подавать ток. Таким образом, с помощью этой контролируемой системы обеспечивается максимальное использование солнечной и ветровой энергии без подключения к сети.

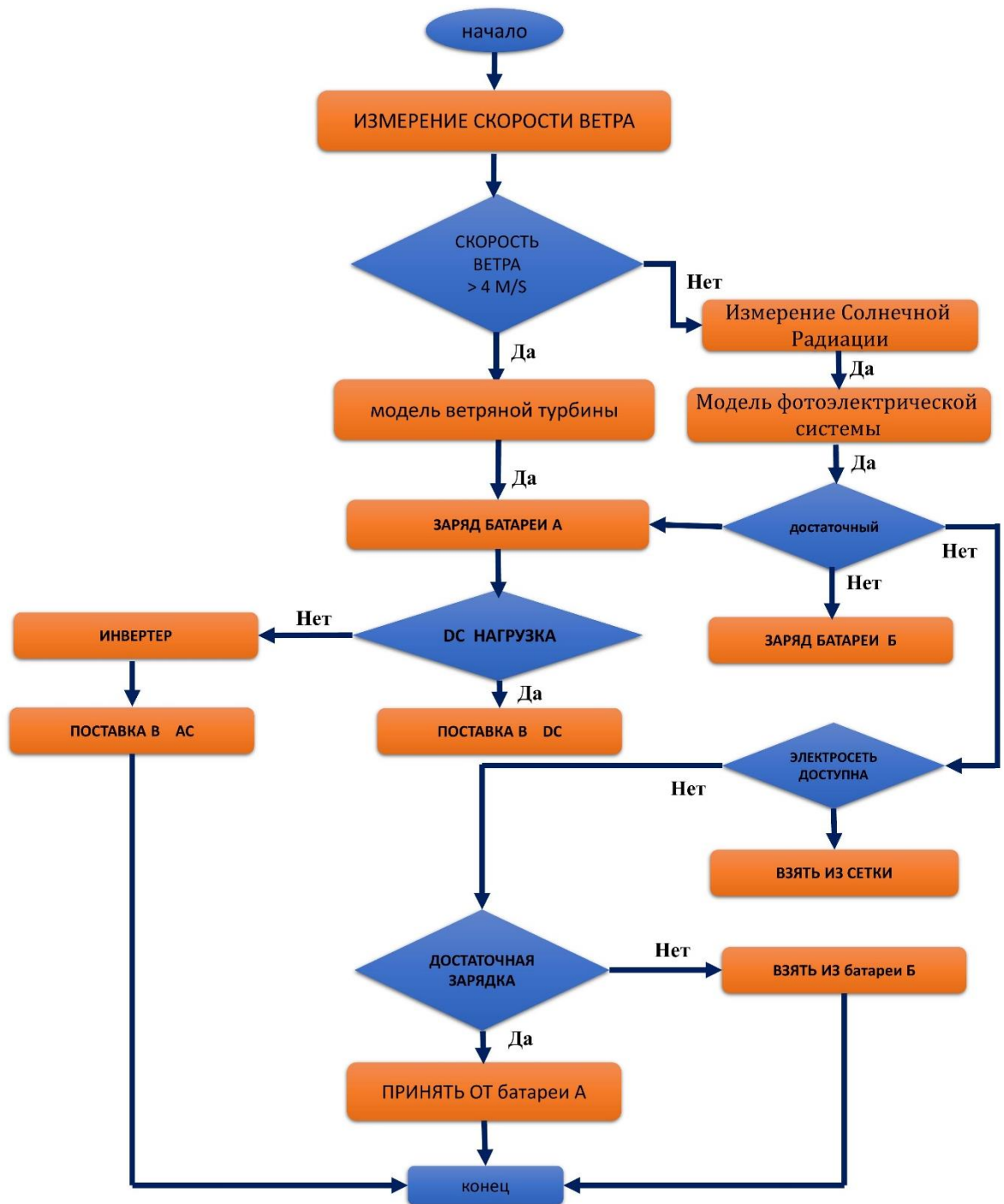


Рисунок 2.44. Блок-схема гибридной солнечной и ветровой системы оптимального размера.

Гибридная солнечно-ветровая система была представлена средой Matlab, как показано на рисунке 2.45. Практические эксперименты гибридной системы

проводились в лабораториях Севастопольского государственного университета, как показано на рисунке 2.46.

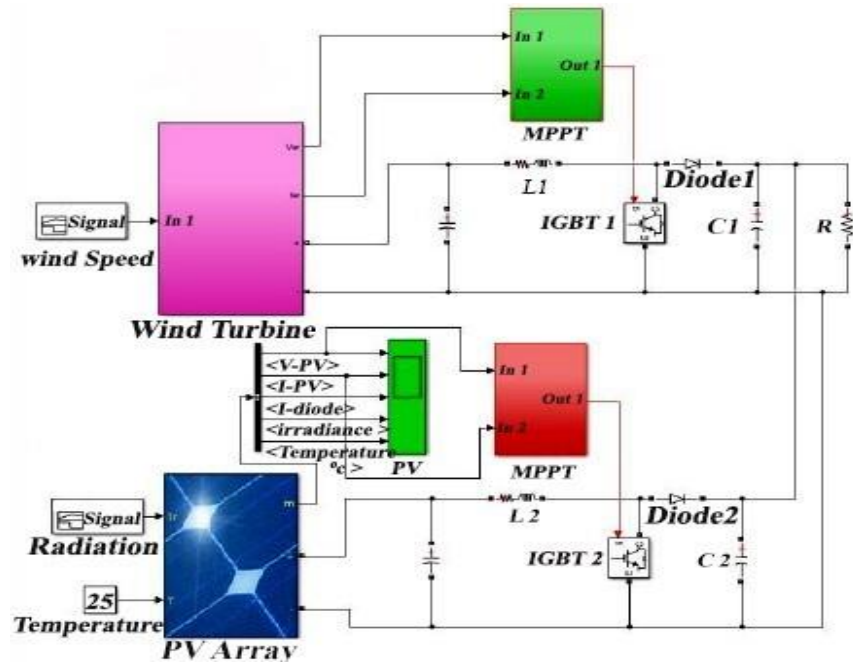


Рисунок 2.45. Компоненты гибридной солнечно-ветровой энергетической системы с использованием среды Matlab/Simulink





Рисунок 2.46. Практический эксперимент исследования гибридной системы в лабораториях Севастопольского государственного университета

Выводы по главе 2

В этой главе описывается динамическая имитационная модель фотогальванической установки, ветровой турбины и литий-ионной батареи. Моделирование и симуляция выполняются с использованием программных пакетов Matlab/Simulink и HOMER Pro x64. Важность поведения гибридной системы, наличие модели очень важны для теоретического изучения.

Двумя способами была разработана и проверена модель для фотоэлектрических установок. Первый заключается в использовании методов контроля точек максимальной мощности (ТММ) и выборе наилучшего технического метода после сравнения трех методов для исследуемых панелей Delta BST 260-24 P. Второй метод заключается в проведении нескольких экспериментов с целью проверки представленной модели. В результате можно сформулировать

вывод, что метод инкрементной проводимости (ИП) фотоэлектрического модуля более эффективен и имеет относительно более высокую выходную мощность, чем метод Р&О и Hill Climbing (НС). Было обнаружено, что как смоделированные, так и измеренные результаты выходной мощности фотогальванического блока хорошо совпадают, стандартное отклонение составляет 0,4 Вт.

Кроме того, предлагается модифицированный алгоритм инкрементной проводимости, который точно реагирует на увеличение уровня солнечного излучения. Чтобы улучшить экономичность и эффективность фотоэлектрических систем, был предложен улучшенный алгоритм инкрементной проводимости для стратегии управления ТММ. Это не только оптимизирует систему, но также повышает эффективность, скорость отклика и эффективность отслеживания мощности фотоэлектрической системы, обеспечивая тем самым стабильную работу энергосистемы.

Программа Matlab /Simulink выполняется в условиях быстро меняющихся уровней солнечной радиации, и сравниваются результаты улучшенного и обычного алгоритма инкрементной проводимости. Результаты экспериментальных данных показывают, что предложенный алгоритм может эффективно выявлять ошибки в работе и предотвращать их появление. Это не только оптимизирует систему, но также повышает эффективность, скорость отклика и эффективность отслеживания мощности фотоэлектрической системы.

Для ветровой турбины конечные результаты моделирования показывают, что устройство управления эффективно поддерживает выходную мощность генератора до его номинальной мощности при больших скоростях ветра, управляя углом установки лопасти. Предложенный метод использует метод Р&О отношения скорости конца лопасти к скорости ветрового потока (TSR коэффициент быстроходности). Получен новый логарифмический механизм управления ветровой турбиной, который обеспечивает плавное управление турбиной в любых

условиях. Было проведено моделирование с использованием среды Matlab для ветровой турбины для подтверждения достоверности предложенного метода ТММ.

Для аккумуляторной батареи были проведены исследования с учётом динамического поведения версии с литий-ионной батареей, проверенной с учетом современной альтернативы и работы батареи SOC. Обнаружено, что когда SOC находится в пределах 20–100 %, коэффициент ошибок между смоделированным напряжением и фактическим напряжением намного меньше 6 %. Также была использована теория принятия решений для гибридных ветро-солнечных систем и процесс оптимизации и определения размеров для гибридной системы.

Достоверность данных, предоставленных пользователем, определяет уровень точности модели. Система, предлагаемая для производства электроэнергии и управления, реализуется в следующей главе.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ГИБРИДНЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК НА ПОЛИГОНЕ СЕВАСТОПОЛЬСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

Описываются исследования установок на основе возобновляемых источников энергии на Севастопольском полигоне высокотехнологичных энергетических систем, расположенном в Севастопольском государственном университете на базе отдыха СевГУ «Горизонт», как показано на рисунке 3.1. Исследования представлены на рисунке 3.2. Для экспериментов использовалась ветровая электростанция с вертикальной осью вращения, мощностью 1,5 кВт, работающая в комбинации с 2 фотоэлектрическими модулями, мощностью по 250 Вт каждый и системой аккумулирования энергии.

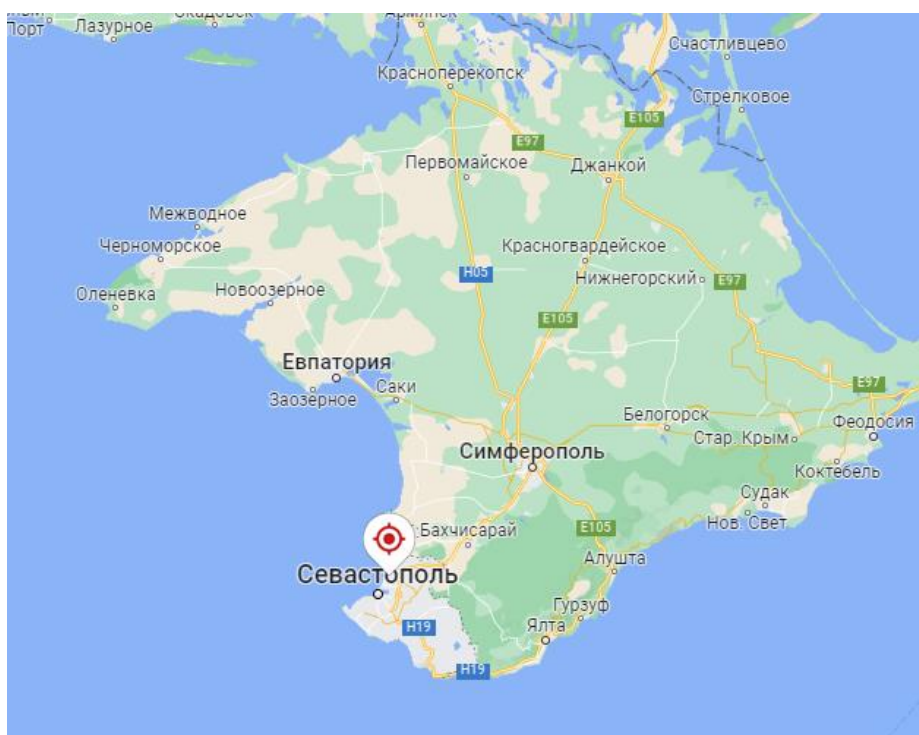


Рисунок 3.1. Расположение лаборатории Севастопольского государственного университета на базе отдыха СевГУ для гибридной ветро-солнечной электростанции



Рисунок 3.2. Расположение установок гибридной ветро-солнечной электростанции в лабораториях Севастопольского государственного университета на базе отдыха «Горизонт».

Севастополь обладает сочетанием природных ресурсов, которые позволяют использовать новые энергетические технологии для удовлетворения почти всех потребностей города в электроэнергии. Эти технологии, прежде всего, основаны на использовании ветра, солнца и других возобновляемых источников энергии.

3.1 Измерение температуры и потока солнечной радиации на территории базы отдыха Севастопольского государственного университета

Севастополь расположен между широтами 44°38'43", 033°32'53" северной широты, а также 44.645208°,033.548126° восточной долготы. На рисунке 3.3 и в таблице 3.1 показана средняя годовая температура в климатических условиях Севастополя.

Таблица 3.1 Среднемесячная температура (с).

месяц	средняя температура °С
Январь	3.93
Февраль	3.40
Март	5.90
Апреля	10.58
Май	15.69
Июнь	20.40
Июль	24.13
Август	24.17
Сентябрь	19.75
Октябрь	14.73
Ноябрь	8.89
Декабрь	4.91

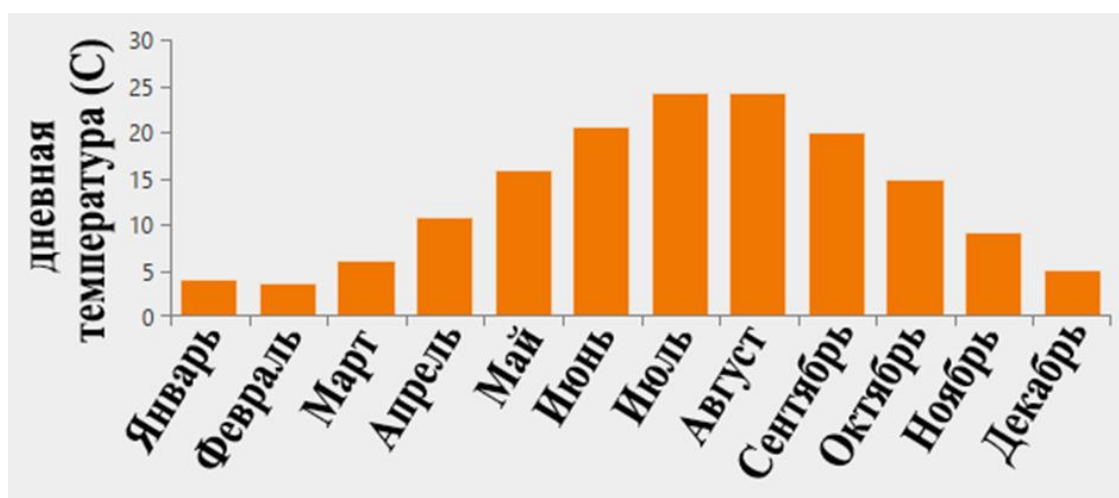


Рисунок 3.3. Среднегодовая температура в климатических условиях Севастополя.

Доступное солнечное излучение на земле рассчитывается двумя основными способами. Первый метод рассчитывается в соответствии с непосредственным нормальным излучением, которое измеряется пиргелиометром, а второй метод – в соответствии с глобальным горизонтальным излучением, которое обычно измеряется пиранометром.

На рисунке 3.4 показан профиль месячного индекса просветления и солнечной радиации, доступный для исследуемого места. Самое низкое значение солнечной радиации составляет около 1,010 кВтч/м²/день в декабре, а максимальное количество солнечного излучения было около 7,260 кВтч/м²/день в июле.

Таблица 3.2 Среднемесячные значения суммарной солнечной радиации
(кВтч/м²/день)

месяц	индекс ясность	(кВтч/м ² /день)
Январь	0.351	1,210
Февраль	0.420	2,050
Март	0.458	3,210
Апреля	0.523	4,840
Май	0.577	6,290
Июнь	0.608	7,050
Июль	0.647	7,260
Август	0.636	6,260
Сентябрь	0.593	4,600
Октябрь	0.525	2,890
Ноябрь	0.407	1,530
Декабрь	0.334	1,010

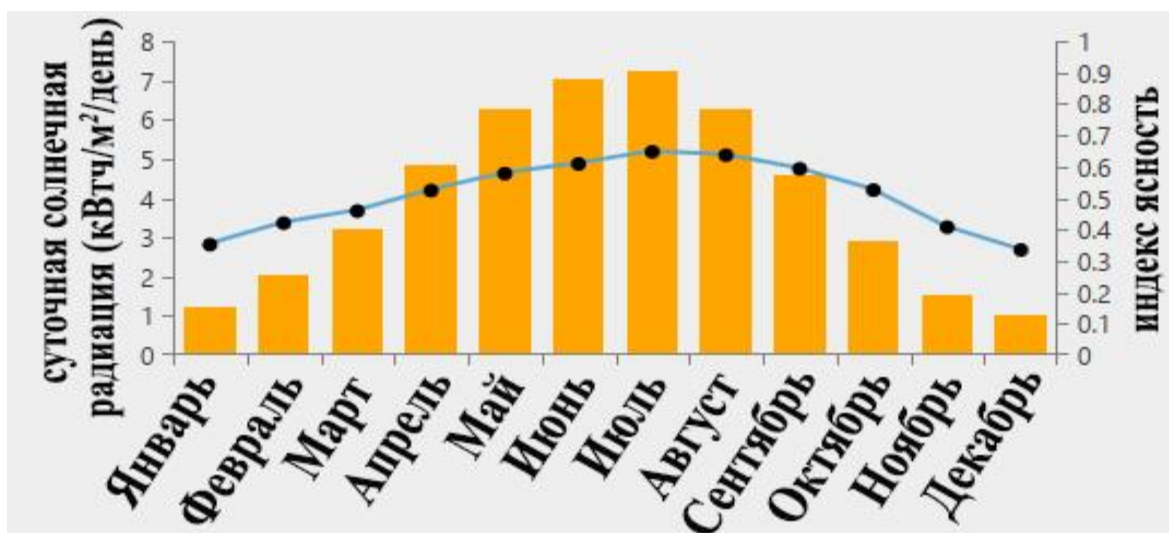


Рисунок 3.4. Среднемесячная солнечная радиация

3.2 Измерение ветроэнергетического потенциала базы отдыха Севастопольского государственного университета

Полигон возобновляемой энергетики Севастопольского государственного университета имеет хорошие условия для исследования ветроэнергетики. Район подвержен сильным ветрам и имеет хорошие логистические условия. Измерения проводились в различных условиях, как показано в таблице 3.3. На рисунке 3.5 показаны полученные среднемесячные данные о скорости ветра. Средняя скорость ветра колеблется от 4,93 м/с до 7,53 м/с, среднегодовая скорость составляет 6,12 м/с.

Таблица 3.3 Среднемесячная скорость ветра (м/с).

месяц	средняя скорость ветра (м/с)
январь	7.53
февраль	7.07
март	6.58
апреля	5.98

май	5.43
июнь	5.14
июль	4.93
август	4.92
сентябрь	5.24
октябрь	6.35
ноябрь	6.82
декабрь	7.45

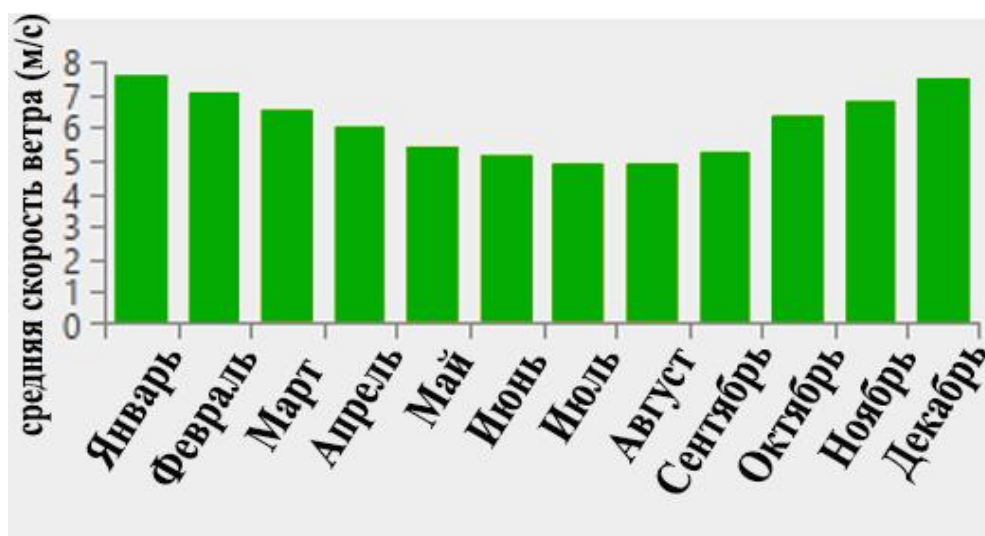


Рисунок 3.5. Среднемесячная скорость ветра (м/с).

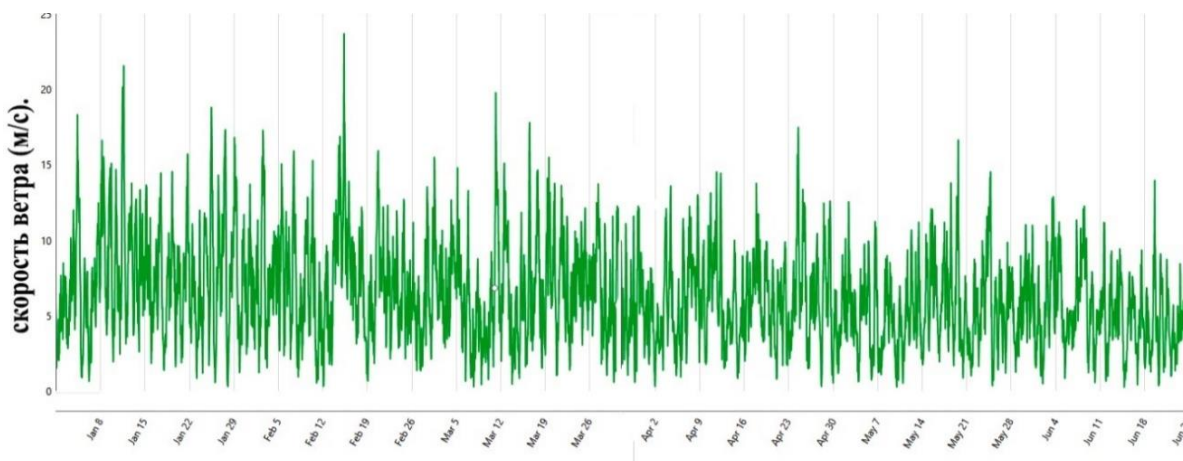


Рисунок 3.6. Среднемесячная скорость ветра (м/с).

3.3 Результаты исследования гибридной ветро-солнечной установки на полигоне Севастопольского государственного университета

Гибридная система (P_T), состоящая из комбинации двух систем солнечной и ветровой, показывает часовые колебания выработки электроэнергии ветровой турбиной ($P_{\text{ветро}}$) и фотоэлектрической системой (P_{PV}) на рисунке 3.7. Где видно, что ветровые турбины генерируют электроэнергию ночью и днем. Кроме того, фотоэлектрические модули генерируют энергию только днем и достигают своего максимального значения во второй половине дня. Для лучшей непрерывности выработки электроэнергии выработка энергии ветра может быть объединена с выработкой солнечной энергии, что является методом успешного производства электроэнергии.

На рисунке 3.7 показаны возможности генерирования энергии солнечными элементами, ветротурбиной в разные месяцы года. В таблице 3.4 приведены годовой вклад различных источников энергии в предлагаемой системе с использованием HOMER программы для экспериментальных исследований по некоторым параметрам (скорость ветра, солнечная радиация и температура).

Видно, что общая годовая выработка электроэнергии от гибридной системы составляет 5633 кВт ч/год, где вклад солнечной энергии составляет 2422 кВт ч/год (43%), а 3211 кВт ч/год (57%) приходится на энергию ветра.



Рисунок 3.7. Среднемесячное значение мощности гибридной ветро-солнечной системы в г. Севастополе

Таблица 3.4. Годовая выработка энергии предлагаемой гибридной системы и энергетический вклад различных источников энергии

	производство	%
Фотоэлектрические модули 12*180 Вт	2,422 кВт ч/ год	43%
Ветроагрегат 1,800 Вт	3,211 кВт ч/ год	57%
Суммарный	5,633 кВт ч/ год	100%

3.4 Результаты моделирования гибридных ветро-солнечных электростанций

Модель была проведена и смоделирована с помощью Matlab /Simulink для определения рабочих характеристик различных возобновляемых источников энергии. Предлагаемая гибридная солнечно-ветровая электрическая система проиллюстрирована в Matlab, как показано на рисунке 3.8. Солнечная система обеспечивается мощностью, когда излучение максимально (дни с ясным небом), тогда как в морозные дни, которые часто бывают облачными, ветровые системы заменят солнечные панели, обеспечивая большим количеством энергии как автономные, так и сетевые устройства. В ходе работы были представлены автономные установки для гибридных солнечных и ветровых энергетических систем в городе Севастополь. Основной причиной выбора участка Севастополь является расположение города с очень хорошим солнечным излучением и достаточной скоростью ветра.

Ирак также имеет уникальное расположение, где солнце неизменно светит при ясных погодных условиях в течение значительной части дня, а выходная мощность фотоэлектрической системы остается постоянной в течение солнечных часов. Для спроектированной системы мощность фотоэлектрических и ветровых турбин

подается в нагрузку, а также сохраняется дополнительная энергия для заряда аккумуляторной системы. Гибридная система используется для зарядки аккумулятора от двух доступных источников, т. е. фотоэлектрической батареи и ветровой турбины, а также защищает аккумулятор от перезаряда и чрезмерного разряда с помощью системы управления. Выходная мощность ветровой турбины также носит стохастический характер в дневное и ночное время. Учитывая такое поведение системы, генерируемой ветровой турбиной, ее энергия не напрямую подается в нагрузку, а через регулятор напряжения постоянного тока, который ограничивает максимальное выходное напряжение. В тех случаях, когда энергоснабжение от фотоэлектрических систем и ветровых турбин недостаточно, батарея будет выступать в качестве источника и поддерживать разрыв между спросом и предложением энергии, чтобы сделать систему более надежной.

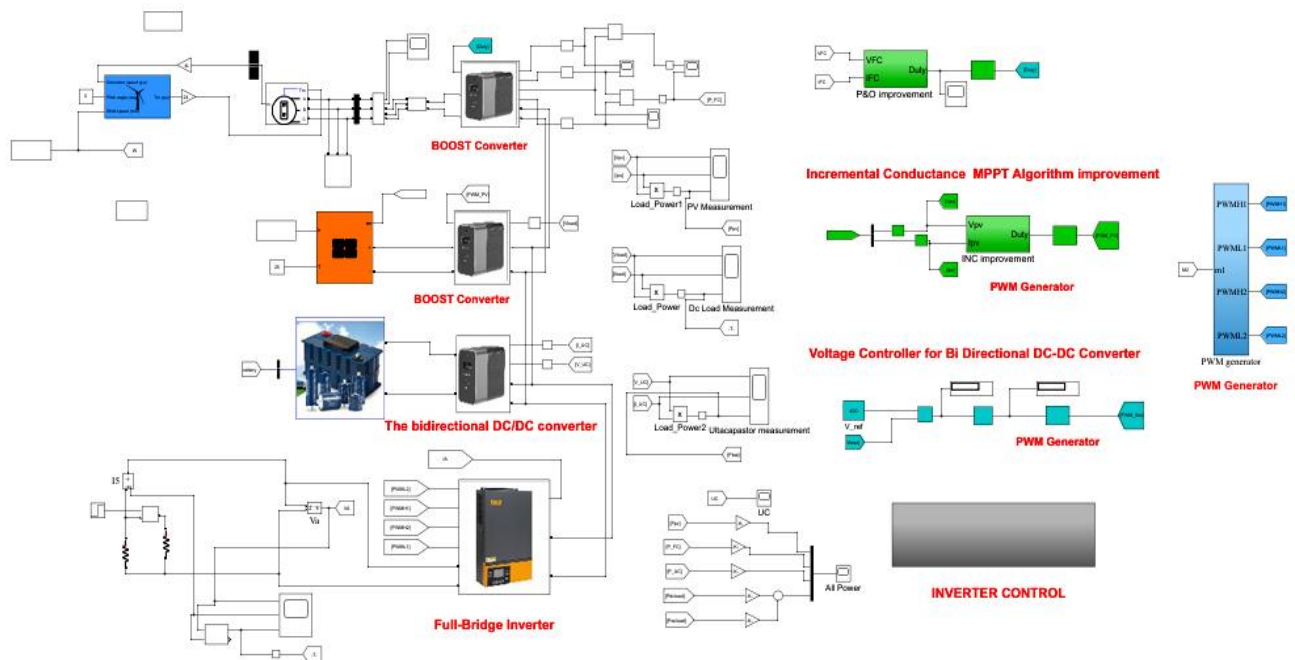


Рисунок 3.8. Структура гибридной ветро-солнечной установки.

Важнейшими ключевыми факторами политики управления энергопотреблением являются уровень энергии, генерируемый солнечными

батареями и ветровыми турбинами, а также уровень заряда батареи. Автономный диспетчер (супервизор) должен управлять потоком энергии между компонентами процесса. Поскольку условия окружающей среды для производства энергии меняются, стратегия управления энергопотреблением может быть сложной. В данной работе блок управления обеспечивает автономную работу гибридной системы. Входной терминал блока управления выглядит следующим образом: выход фотоэлектрической панели, выход ветровой турбины, батарея и автономные переменные нагрузки. Выходными клеммами являются контроллер между инвертором постоянного тока в переменный, автономные нагрузки и выключатель на кабеле батареи.

На рисунках показаны выходные графики моделирования, когда гибридная система работает с переменной нагрузкой. Производительность гибрида с ветровой турбиной мощностью 1800 Вт и $(180 * 12)$ Вт от фотоэлектрических панелей с батареей мощностью 2 кВт моделируется для обеспечения переменной нагрузки (2-3,5) кВт. Батарея с мостовым преобразователем постоянного тока подключается к шине постоянного тока. Результаты моделирования ветровой турбины показаны на рисунке 3.9. Производительность выпрямителя мощности на ветроэлектрической установке при переменной скорости ветра и производительность повышающего преобразователя для ветротурбины. Эталонная частота ротора варьируется от 110 рад/с до 204 рад/с. Отношение скоростей конца лопасти (λ) и коэффициент мощности C_p поддерживаются на уровне 8,1 и 0,48 соответственно. Рисунок 3.10 описывает стабильность напряжения ветрогенератора при 240 В и стабильном состоянии тока.

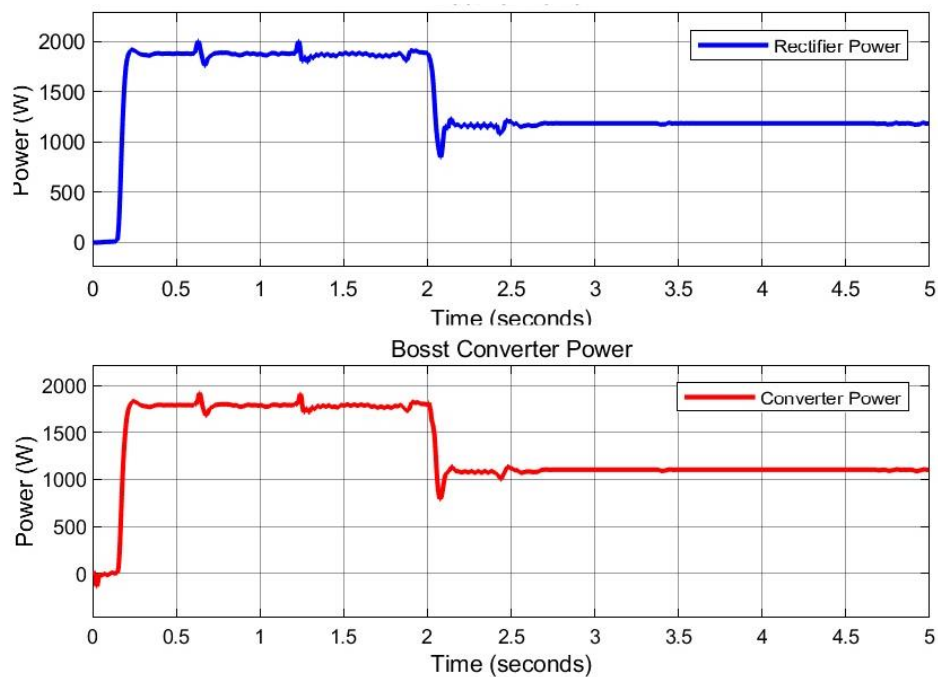


Рисунок 3.9. Мощность ветровой турбины в отражателе и в повышающем преобразователе

Рисунок.3.11. описывает состояние напряжения, тока и мощности для нагрузки переменного тока. Видно, что за вторую секунду нагрузка увеличилась с 1 кВт до 2,5 кВт. Мощность, напряжение и ток PV представлены на рисунке 3.12, когда генерация солнечной фотоэлектрической панели уменьшается или увеличивается. Солнечная батарея удовлетворяет потребности нагрузки, а также подает активную мощность, когда ветротурбины работают при низких скоростях ветра. Напряжение нагрузки постоянного тока (V_{dc}), ток (I_{dc}) и мощность (P_{dc}) изменяются в зависимости от солнечной инсоляции, как показано на рисунке 3.13.

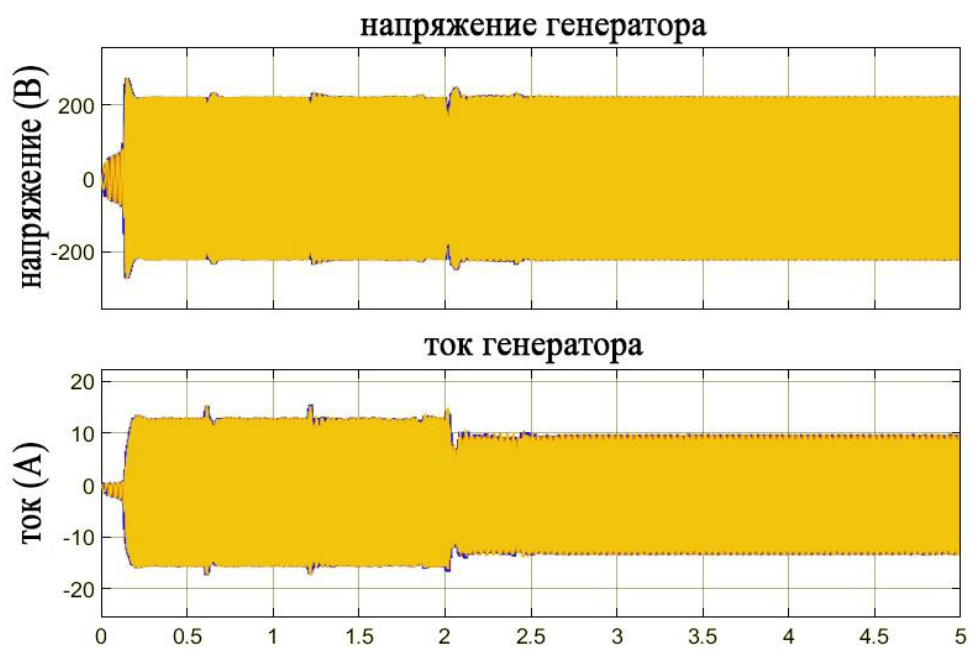


Рисунок 3.10. Напряжение и ток ветрогенератора.

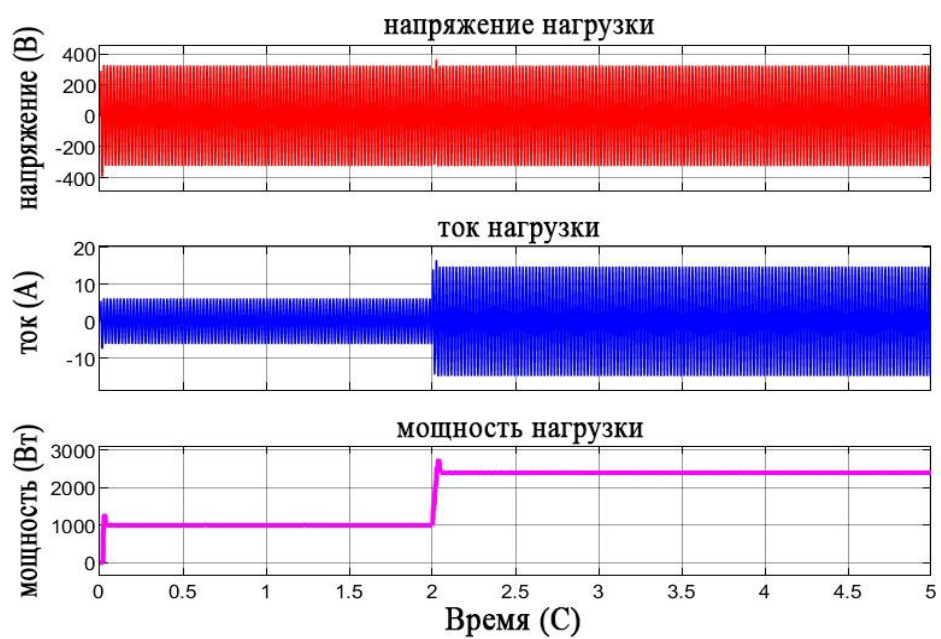


Рисунок 3.11. Напряжение, ток и мощность альтернативной нагрузки.

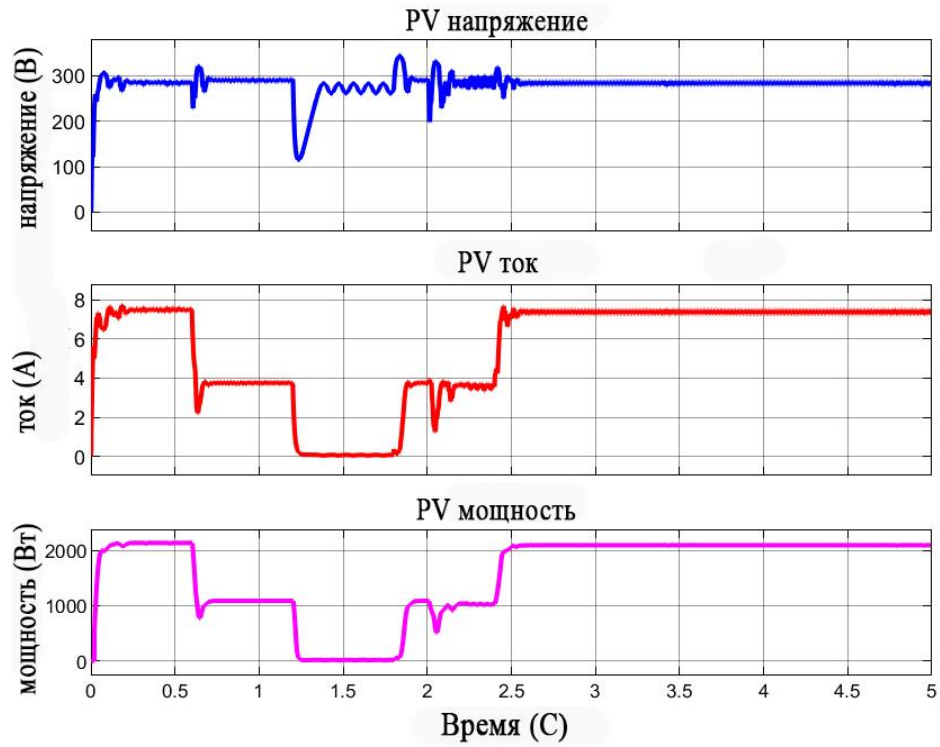


Рисунок 3.12. Напряжение, ток и мощность фотоэлектрические панели.

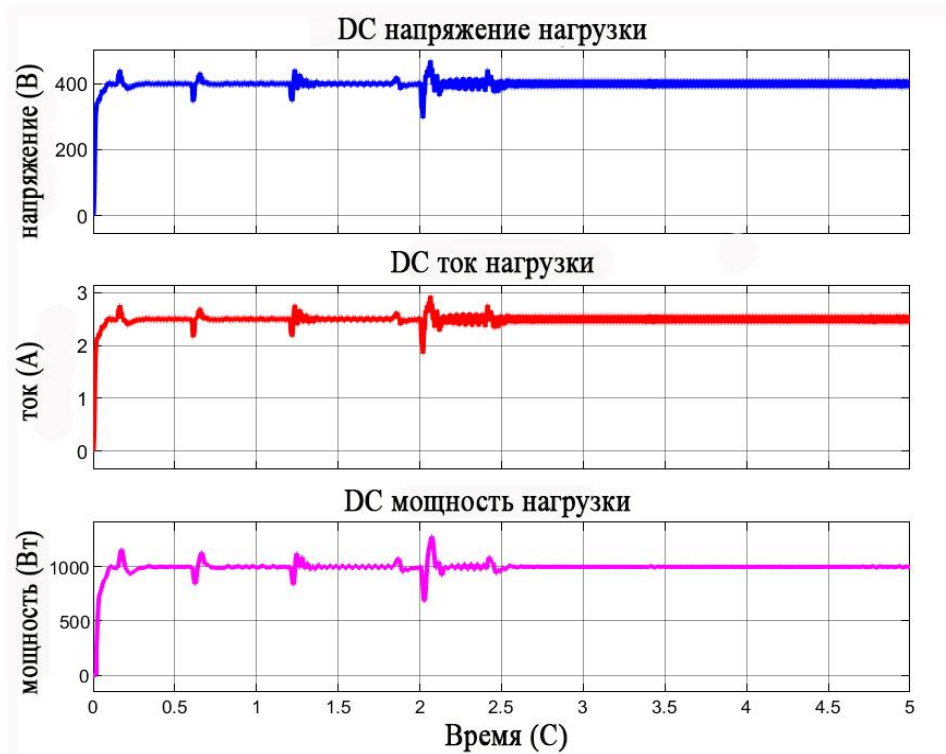


Рисунок 3.13. Напряжение, ток и мощность нагрузки постоянного тока.

Работоспособность системы управления батареями показана на рисунке 3.14. Когда генерируемая мощность превышает требуемую мощность, система начинает заряжать аккумулятор или использовать его, когда это необходимо.

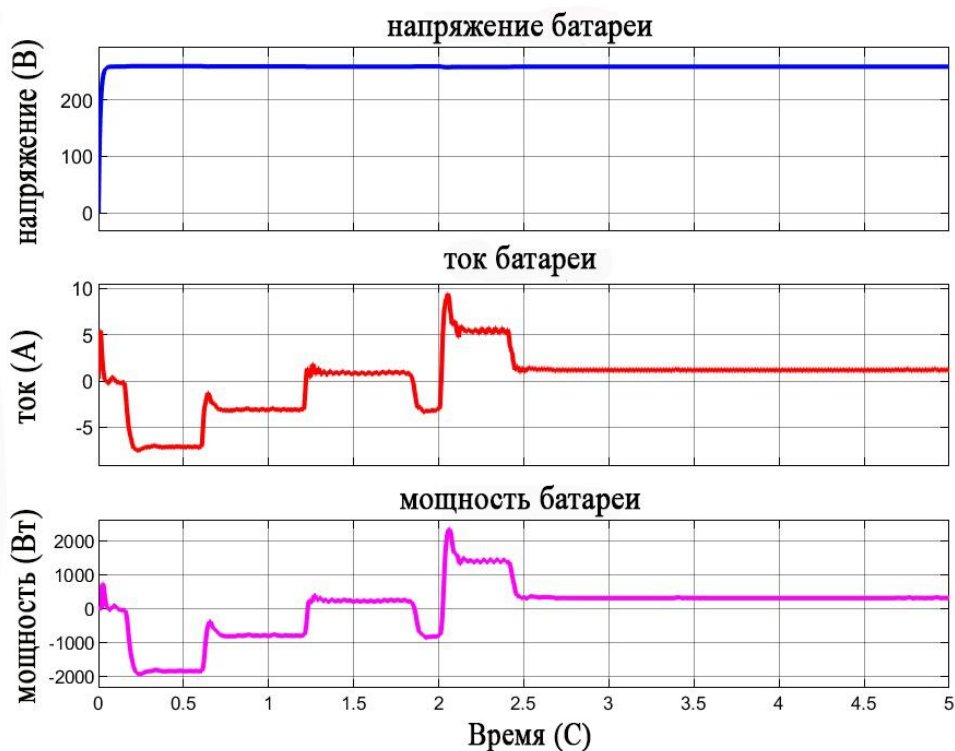


Рисунок 3.14. Напряжение, ток и мощность зарядки и разрядки аккумулятора.

На рисунке 3.15 показана выходная мощность гибридной системы PV-ветер-аккумулятор с использованием традиционного метода управления. Очевидно, что использование предложенного метода максимальной точки мощности, как показано на рисунке 3.16, может обеспечить адаптивное управление состоянием заряда батареи в соответствии со стабильным производством путем сглаживания процессором управления мощности гибридной фотоэлектрической системы. При этом контрольная точка для стабильной выходной мощности гибридной фотоэлектрической и ветровой также будет сохранена. В результате предлагаемая стратегия управления может быть эффективной и более стабильной для системы, таким образом, она может увеличить производительность гибридной системы

производства энергии ветрового потока и солнечной радиации без увеличения ёмкости хранения энергии или потери энергии от ветра или солнца.

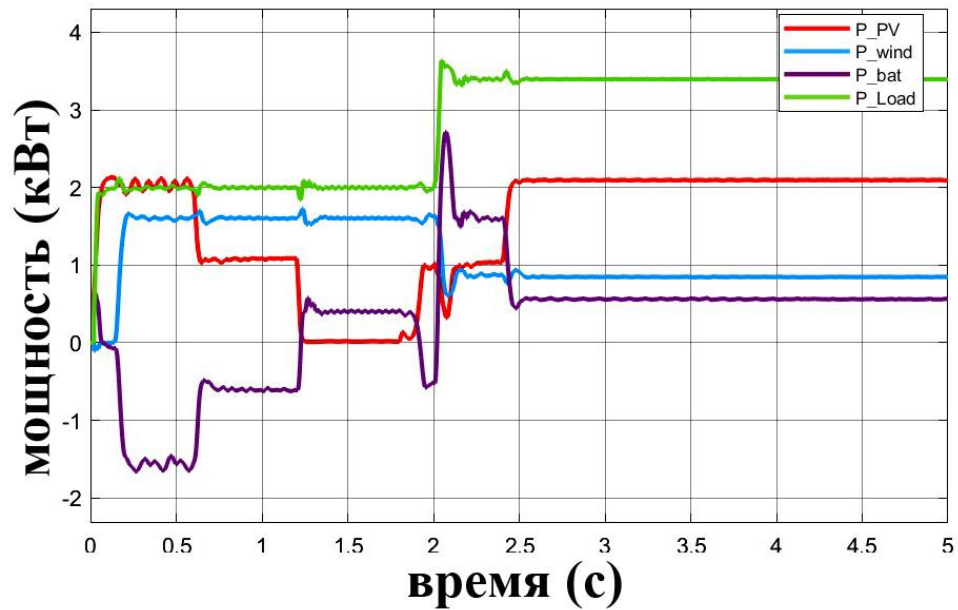


Рисунок 3.15. Выходная гибридная мощность с использованием традиционного ТММ алгоритма.

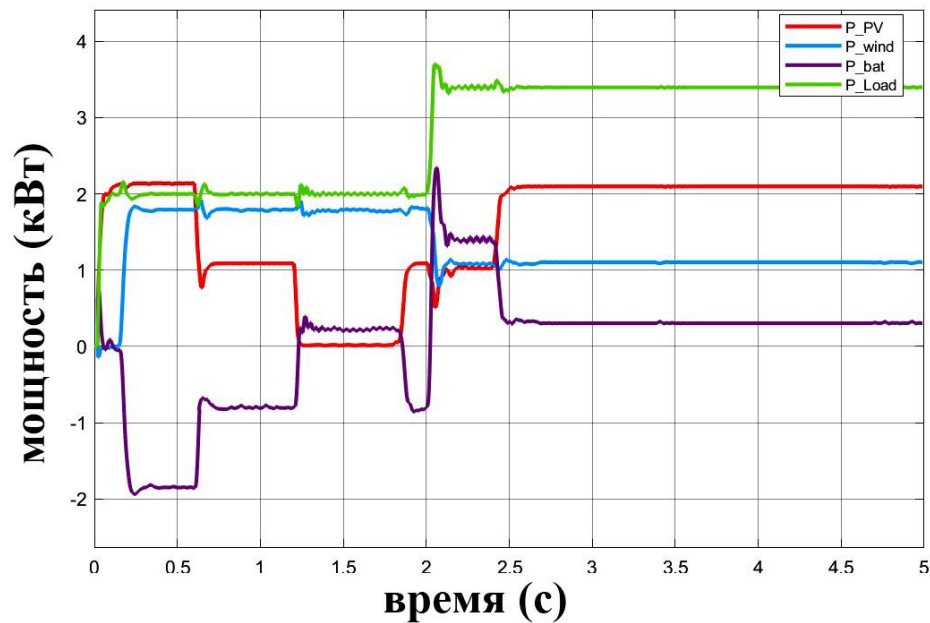


Рисунок 3.16. Выходная гибридная мощность с использованием модифицированного ТММ алгоритма.

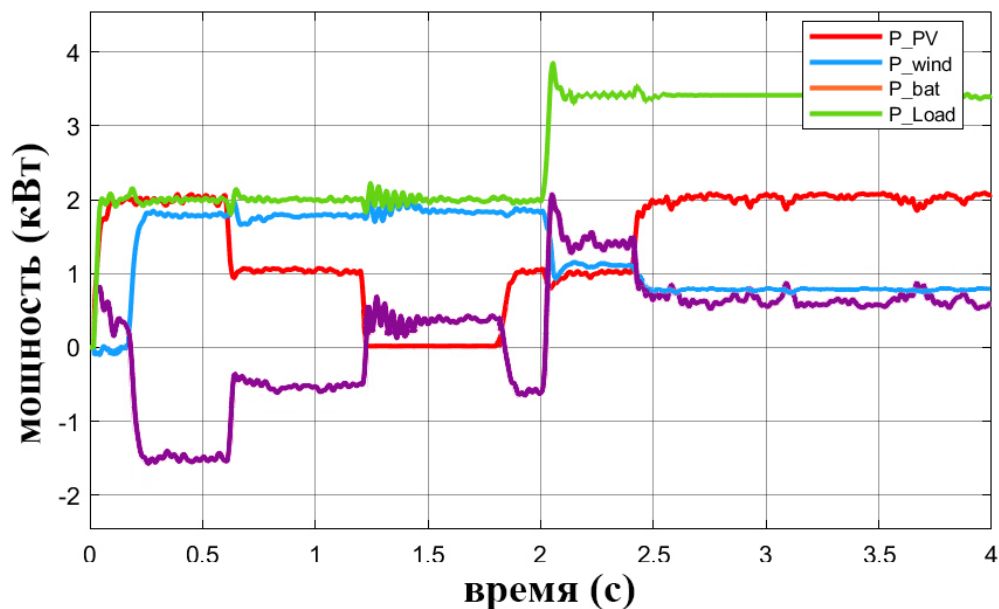


Рисунок 3.17. Выходная гибридная мощность без использования ТММ алгоритма.

Выводы по главе 3

Результаты эксперимента дают представление о том, как функционирует система генерации электроэнергии с несколькими источниками и как её использовать на практике благодаря результатам испытаний. Кроме того, с помощью программного пакета Matlab/Simulink была спроектирована, смоделирована и реализована новая гибридная энергетическая система – ветро-солнечная установка. Поскольку доступная мощность предлагаемой фотоэлектрической системы сильно зависит от солнечной радиации, чтобы преодолеть этот недостаток, фотоэлектрическая система была интегрирована с системой ветровых турбин. Динамическое поведение предложенной модели было исследовано в различных условиях эксплуатации. Данные о солнечном излучении и скорости ветра были собраны для ветро-солнечной установки, установленной в Севастополе. Разработанная система и ее стратегия управления показали отличные результаты. Предлагаемая модель предлагает надлежащий инструмент для

оптимизации производительности. В целом, ветро-солнечные гибридные энергетические системы признаны жизнеспособной альтернативой автономным фотоэлектрическим или ветровым системам во всем мире.

Кроме того, солнечная и ветровая подсистемы работают на стабильной мощности, используя алгоритм точки максимальной мощности для солнечной энергии и для ветрогенератора для того, чтобы держать источник питания стабильным. Аккумуляторная система автоматически подключается к общей шине (шине постоянного тока) или отключается от нее в случае любого дисбаланса между мощностью и потреблением, будь то в случаях избыточной выработки или дефицита энергии. Когда возобновляемые источники энергии недоступны, избыточная энергия, хранящаяся в аккумуляторе, компенсирует энергетический разрыв. Система управления эффективно справляется со сложностями, возникающими из-за прерывистого характера возобновляемых источников энергии.

В итоге можно утверждать, что проведенные на полигоне Севастопольского государственного университета исследования ветро-солнечных установок показали, что эффективность работы электроэнергетической системы значительно возрастает. Это может обосновываться тем, что Севастопольский район имеет уникальное расположение по географии. При этом площадка базы отдыха «Горизонт» расположена на открытой местности на склоне Черноморского побережья, что позволяет эффективно использовать как солнечное излучение, так и ветровой поток.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВОК В ГОРОДЕ АЛЬ-НАДЖАФ В ИРАКЕ

Многие районы Ирака, как и ранее, сталкиваются с трудностями в электроснабжении, из-за отсутствия вырабатываемой электроэнергии. Ирак расположен между $29^{\circ} 5'$ и $37^{\circ} 22'$ северной широты, а также $38^{\circ} 45'$ и $48^{\circ} 45'$ восточной долготы, как показано на рисунке 4.1. Для проведения исследований работы гибридного ветро-солнечного комплекса требуется чётко знать значения ветрового потенциала и солнечной инсоляции представленного региона. Для этого проведем описание климатических характеристик территории города Аль Наджаф в Ираке, где располагаем гибридную ветровую солнечную станцию для экспериментального изучения возможности применения этого вида энергии в Ираке. Такая особенность позволяет правительству Ирака решить проблему электроэнергетики при помощи возобновляемых энергоресурсов, таких как энергия солнца и ветрового потока.

Для экспериментов использовалась ветровая электростанция с вертикальной осью вращения мощностью 1,8 кВт, работающая в комбинации с тремя фотоэлектрическими модулями, мощностью по 180 Вт, как показано в таблице 4.1, с системой аккумулирования энергии.

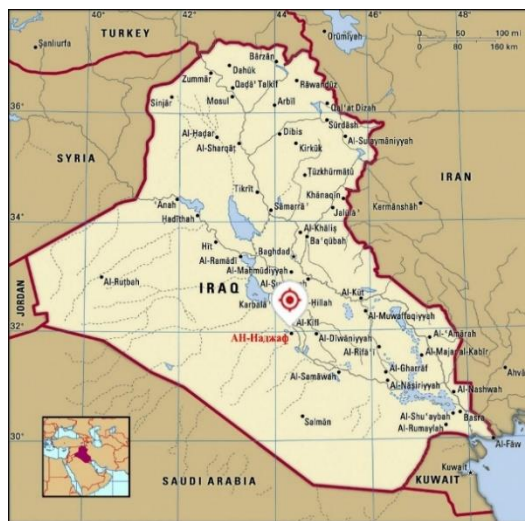


Рисунок 4.1. Расположение ветроэлектрической станции в Республике Ирак
г. Наджаф

Таблица 4.1. Технические характеристики для солнечных панелей LDK 180D-24(s)

Солнечный модуль Параметр	LDK 180D-24(s)
Максимальная мощность (P_{max})	180 Вт
Напряжение при P_{max} (U_{mp})	36,2 В
Ток при P_{max} (I_{mp})	4,98 А
Гарантированный минимум $P_{мин}$	174.6 Вт
Ток короткого замыкания (I_{sc})	5,46 А
Напряжение холостого хода (V_{oc})	44,9 В
Температура Коэффициент I_{sc}	0,06 %/°C
Температура Коэффициент V_{oc}	-0,34 %/°C
Температура Коэффициент силы	-0,47 %/°C
НОСТ	45±2 °C
Количество серийных ячеек, N_s	72
Рабочая Температура	-40°C to +85°C

4.1 Измерение температуры и потенциала солнечной радиации в провинции Аль-Наджаф в Ираке

Страна находится в непосредственной близости от солнечного тропика, и в среднем получает 6-7 кВт*ч излучения на квадратный метр. Периоды солнечной активности: от 2500 до 3500 часов в год. На рисунке 4.2 и в таблице 4.2 показана средняя годовая температура для климатических условий города Аль-Наджаф.

Таблица 4.2 Среднемесячная температура (с).

месяц	средняя температура °C
январь	11,05
февраль	13
Март	18
апреля	24,29
май	31

июнь	36
июль	39
август	37
сентябрь	33
Октябрь	28
ноябрь	19
Декабрь	12

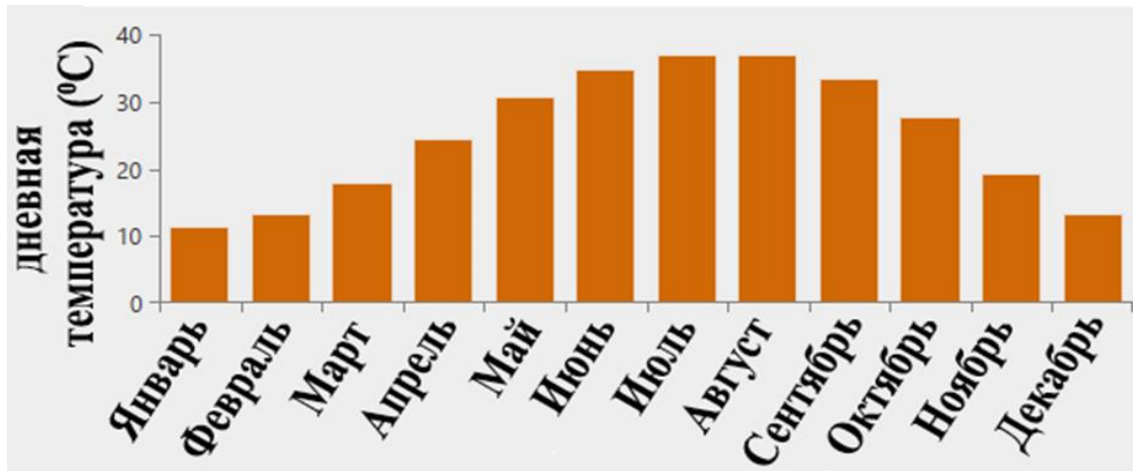


Рисунок 4.2. Среднегодовая температура в климатических условиях г. Аль-Наджаф.

В январе максимальная температура колеблется от 11°C, а минимальная температура составляет 4°C. В июле максимальная температура колеблется в пределах 48-50°C, а минимальная температура составляет 31°C.

Рисунки 4.3 и 4.4 показывают, что в июне самая высокая действительная яркость солнца составляет 11,4 часа в день, а самая низкая в январе — 6,3 часа в день.

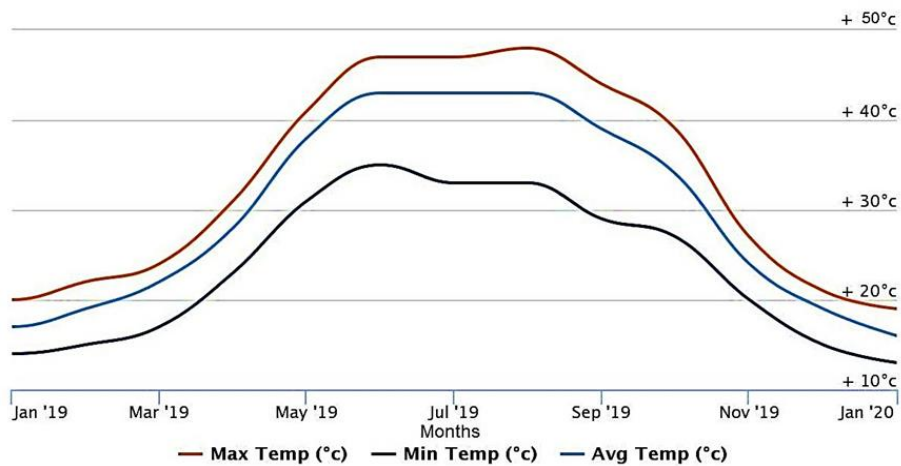


Рисунок 4.3. Средние солнечные часы и солнечный день

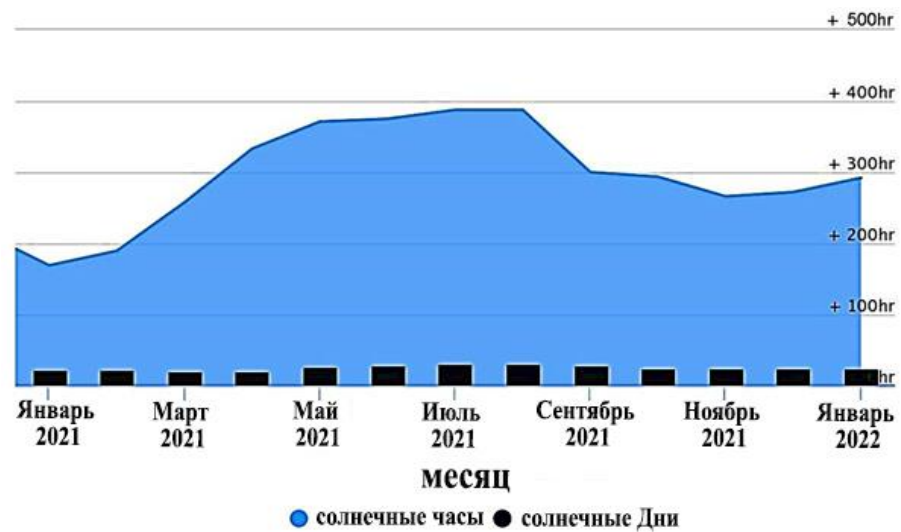


Рисунок 4.4. Средние солнечные часы и солнечный день

В октябре относительная влажность колеблется от 25,5% до 73,8%. Ввиду их очевидной важности в климатическом балансе Аль-Наджафа работа гибридной энергетической системы будет основана на двух видах возобновляемой энергии, а именно на потоке солнечной энергии и энергии ветра.

Солнечная энергия – одно из наиболее эффективных средств выработки электроэнергии в местах, удаленных от национальной сети, но отличающихся

изобилием солнечного света. Таким образом, солнечная энергия является главным источником энергии для всей системы.

Фотоэлектрические системы состоят из модулей. Последние также включают несколько последовательно или параллельно связанных солнечных элементов, образующих солнечную батарею.

Фотоэлектрические массивы моделируются HOMER, как устройства, генерирующие электрическую энергию постоянного тока, пропорционально воздействию на них солнечного излучения, вне зависимости от температуры и напряжения. В этом анализе использовались 550 Вт. Уравнение показывает количество энергии, вырабатываемой фотоэлектрической системой. На рисунке 4.6. показаны данные о ежемесячном горизонтальном солнечном излучении предлагаемого участка.

$$E_{pv} = A \times \eta_m \times P_f \times \eta_{pc} \times I \quad (4.1)$$

где A - площадь фотоэлектрических модулей (m^2),

η_m - эффективность модуля (0,111),

P_f - коэффициент упаковки (0,9),

η_{pc} - КПД кондиционирования (0,86),

и I - излучение ($кВт\ ч/м^2$)

В ходе выполнения работы был проведен анализ климатических особенностей города Аль-Наджаф в Ираке. В работе были использованы климатические данные для предлагаемого места. Для анализа выработки гибридной ветро-солнечной установки воспользуемся данными среднемесячной солнечной радиации, приведёнными в таблице 4.3 для выбранного района. Цель исследования заключалась в изучение возможностей использования гибридных ветро-солнечных систем для снижения дефицита электроэнергии в Ираке.



Рисунок 4.5. Процесс измерения потока солнечной радиации

Таблица 4.3 Среднемесячные значения суммарной солнечной радиации (кВтч/м²/день)

месяц	(кВтч/м ² /день)
Январь	2,790
Февраль	3,740
Март	4,930
Апреля	5,870
Май	6,940
Июнь	8,130
Июль	7,790
Август	7,090
Сентябрь	6,010
Октябрь	4,270
Ноябрь	2,920
Декабрь	2,490

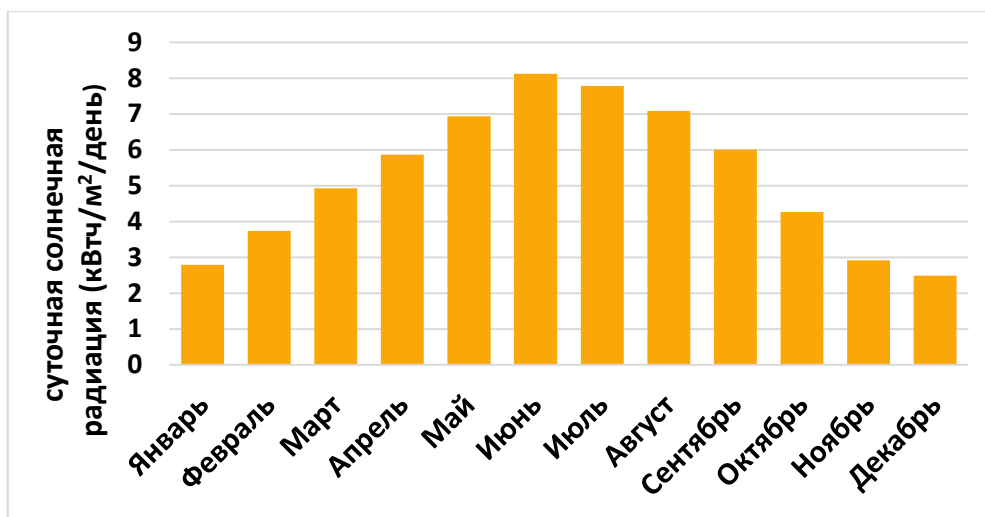


Рисунок 4.6. Среднемесячная солнечная радиация

Солнечная энергия представляет собой один из наиболее важных источников возобновляемой энергии в Ираке. Эта энергия доступна почти повсеместно, бесплатно и имеет высокую выходную мощность для использования на солнечных станциях (СЭС) и для работы фотоэлектрических преобразователей. Тепловая энергия также может быть использована для нагрева воздуха и воды для бытовых нужд

Фотоэлектрические элементы могут использоваться для выработки электроэнергии в удаленных районах, где нет сетевых подключений. Они могут использоваться для наружного уличного освещения и эксплуатации вышек связи в удаленных местах.

4.2 Измерение ветроэнергетического потенциала на территории города Аль-Наджаф

Ветер является самым доступным источником электроэнергии в мире. Эта энергия, используется для преобразования кинетической энергии ветрового потока в электрическую энергию. Движение ветрового потока создает вращательное

движение лопастей ветротурбины, которое используется для выработки электроэнергии.

Электроэнергия вырабатывается ветряными турбинами, имеющими три лопасти, закрепленные на горизонтальной плоскости и вращающиеся. Затраты продолжают снижаться, в то время как разработки в этой области продолжают развиваться.

Измерения проводились в различных условиях, как показано в таблице 4.4 и рисунке 4.7. Они иллюстрируют полученные среднемесячные данные о скоростях ветра. Средняя скорость ветра колеблется от 4,42 м/с до 6,21 м/с, среднегодовая скорость составляет 5.41 м/с

Таблица 4.4 Среднемесячная скорость ветра (м/с).

месяц	средняя скорость ветра (м/с)
январь	4.69
февраль	5.31
Март	6.05
апреля	6.07
май	5.85
июнь	6.16
июль	6.21
август	5.83
сентябрь	4.87
Октябрь	4.91
ноябрь	4.42
Декабрь	4.55



Рисунок 4.7. Среднемесячная скорость ветра (м/с).

4.3 Результаты моделирования гибридных ветро-солнечных установок на территории города Аль-Наджаф в Ираке

Гибридная система (P_T), состоящая из комбинации двух систем солнечной и ветровой, показывает часовые колебания выработки электроэнергии ветровой турбиной ($P_{\text{ветро}}$) и фотоэлектрической системой (P_{PV}). Ветровые турбины могут генерировать электроэнергию ночью и днем. В то время как фотоэлектрические модули генерируют энергию только днем и достигают своего максимального значения во второй половине дня. Для лучшей равномерности выработки электроэнергии, преобразование энергии ветра можно объединить с преобразованием солнечной энергии, что является методом успешного производства электроэнергии.

Потенциал производства электроэнергии с помощью солнечных батарей и ветровой турбины в различные месяцы года показан на рисунке 4.8. Годовой вклад различных источников энергии в гибридную солнечно-ветровую систему показан в таблице 4.5 с использованием HOMER программы.



Рисунок 4.8. Среднемесячное производство выходной мощности для гибридной солнечно-ветровой системы в Г. Аль-Наджаф в Ираке

Таблица 4.5. Годовая выработка энергии предлагаемой гибридной системы и энергетический вклад различных источников энергии

	производство	%
Фотоэлектрические модули 12*180 Вт	3,810 кВт ч/год	60 %
Ветроагрегат 1,800 Вт	2,540 кВт ч/год	40 %
Суммарный	6,350 кВт ч/год	100 %

4.4 Экспериментальное исследование гибридной ветер-солнечной системы

Эксперименты проводились на 12 солнечных модулях (LDK 180D-24(s)) и ветряной турбине 1800 Вт в солнечных и облачных условиях. Средняя температура составляла от 18 до 37°C, как показано на рисунках 4.2 и 4.6, а средняя скорость ветра составляла от 3,7 до 3,6 м/с в дни испытаний в течение 6 месяцев с марта по август. Как показано в таблице 4.5 и рис. 4.8, максимальная выходная мощность ветряной турбины составляла 514 Вт, бывают случаи, когда ветровые турбины не

обеспечивают электроэнергию из-за отсутствия ветра. Кроме того, солнечные панели обеспечивали непрерывное питание в течение всего тестового дня, что означает, что фотоэлектрические модули вырабатывают энергию только днем и достигают своего максимального значения в полдень, фотоэлектрические модули не работают ночью. Для 12 солнечных модулей средняя минимальная мощность, вырабатываемая солнечными модулями, составила 361 Вт, а максимальная мощность - 735 Вт.

Основная цель исследования гибридной возобновляемой системы заключается в том, чтобы система могла обеспечивать непрерывную подачу энергии в различных погодных условиях таких, когда работают ветровые турбины или солнечные батареи. В течение нескольких дней отдельные системы тестируются в течение восьми с половиной часов с 07:30 до 15:42. Показания записываются, как показано в таблицах с 4.6 по 4.11. После тестирования систем по отдельности, системы были протестированы еще раз, чтобы создать новую гибридную систему путем интеграции ветряных турбин с солнечными панелями. Гибридная система создается из ветряных турбин с гибридной системой и солнечными панелями. Кроме того, период тестирования такой же, как и у отдельных систем, и составляет от 07:30 до 15:42 (восемь часов).

Это сравнение показывает гибридную систему и наличие единой системы. Испытание началось с 12 солнечных панелей и ветряной турбины. Выходная мощность гибридной системы варьировалась от 1240 Вт до 563 Вт, среднее значение составляло 781 Вт в марте, а выходная мощность была выше, чем у отдельных систем.

Таблица 4.6. Результаты средней выходной мощности для гибридной солнечно-ветровой системы в марте.

Время	Мощность (Вт)		
	Ветроагрегат	Солнечные панели	Гибридная установка
8:18	310.90	434.62	715.34
8:26	392.77	404.71	786.24
8:32	415.19	466.66	756.99
8:39	377.81	466.66	738.15
8:53	340.60	471.88	700.46
8:58	335.17	491.91	642.61
9:06	312.69	496.27	648.56
9:14	261.53	484.08	653.56
9:20	223.60	484.08	671.37
9:28	279.36	484.08	653.71
9:35	273.16	492.79	689.55
9:42	277.04	514.56	686.58
9:57	260.76	518.91	733.19
10:04	259.21	521.52	752.03
10:12	283.24	536.33	764.92
10:26	299.52	543.30	746.08
10:36	291.76	588.14	796.16
10:41	227.73	563.33	774.84
10:56	287.11	558.10	782.78
11:01	286.34	562.46	796.33
11:06	304.17	565.07	846.74

11:10	345.88	572.04	899.02
11:19	380.28	584.23	857.16
11:26	359.20	584.23	894.85
11:34	357.65	580.74	891.87
11:54	328.20	587.71	890.55
11:59	314.24	591.19	940.96
12:01	377.81	603.39	990.97
12:24	397.18	608.61	981.87
12:31	406.87	620.80	969.23
12:38	360.77	644.32	999.97
12:45	350.70	713.30	1032.70
12:50	435.94	686.12	1088.90
13:03	472.37	702.67	1162.62
13:18	516.56	700.06	1226.09
13:25	521.98	705.28	1234.03
13:33	537.49	735.81	1240.09

Таблица 4.7. Результаты средней выработки мощности для гибридной солнечно-ветровой системы в апреле.

Время	Мощность (Вт)		
	Ветроагрегат	Солнечные панели	Гибридная установка
8:30	229.69	819.28	1041.30
8:33	229.59	819	1002.72
8:43	198.693	818.79	1063.59

8:55	217.47	868.34	1002.15
9:02	136.87	887.19	998.07
9:19	212.95	871.60	1055.32
9:35	235.47	840.62	1124
9:49	273.35	847.91	1066.35
9:57	173.57	840.03	1096.61
10:07	207.75	870.36	1050.3
10:18	264.87	808.71	1026.9
10:29	325.81	823.78	1126.12
10:42	218.21	831.04	1083.69
10:53	183.45	807.82	995.38
11:04	209.91	845.63	1033.29
11:13	236.46	837.51	1074.98
11:27	190.10	806.56	994.16
11:35	239.65	844.55	1097.29
11:51	311.94	867.14	1173.66
12:09	330.56	862.88	1165.64
12:17	269.08	881.59	1192.10
12:30	230.42	896.51	1103.6
12:46	256.74	903.87	1103.25
13:02	306.30	918.91	1217.56
13:15	352.25	949.54	1278.82
13:24	290.99	987.83	1255.85
13:34	302.47	1010.81	1393.69
13:42	398.19	1041.44	1470.27
13:58	459.45	1022.29	1508.55
14:12	455.63	1029.95	1454.95

14:21	405.85	1046.75	1442.32
14:33	428.82	1087.38	1520.27
14:50	485.77	1080.38	1569.84

Таблица 4.8. Результаты средней выходной мощности для гибридной солнечно-ветровой системы в май месяце.

Время	Мощность (Вт)		
	Ветроагрегат	Солнечные панели	Гибридная установка
8:02	231	785	1011
8:06	233	828	1025
8:10	233	848	1065
8:14	247	872	1086
8:19	247	874	1086
8:34	247	906	1113
8:38	247	900	1104
8:43	247	900	1099
8:53	245	880	1088
8:58	274	865	1099
9:02	299	843	1108
9:07	296	820	1092
9:12	287	800	1052
9:22	276	850	1061
9:26	274	850	1086
9:31	258	841	1072

9:41	265	830	1045
9:46	274	814	1032
9:50	276	825	1036
9:55	287	821	1045
10:00	296	801	1045
10:09	305	786	1029
10:14	292	790	1018
10:19	287	799	1018
10:24	287	799	1018
10:29	290	808	1023
10:33	308	816	1050
10:38	326	834	1083
10:43	324	865	1117
10:48	315	889	1140
10:53	315	874	1144
10:58	315	854	1126
11:02	310	863	1113
11:07	294	885	1113
11:12	287	894	1117
11:17	287	905	1126
11:21	287	905	1133
11:26	294	907	1140
11:31	301	911	1142
11:36	287	905	1142
11:41	283	914	1135
11:45	285	951	1142
11:49	292	1000	1187

11:52	308	1035	1237
11:55	328	1040	1280
12:00	342	1048	1304
12:05	355	1066	1329
12:10	355	1088	1361
12:14	353	1115	1392
12:19	342	1148	1422
12:24	333	1174	1446
12:29	319	1190	1464
12:34	335	1197	1467
12:38	367	1182	1480
12:43	368	1148	1507
12:48	372	1161	1532
12:58	372	1161	1546
13:02	363	1161	1541
13:07	354	1150	1532
13:12	363	1161	1541
13:17	377	1172	1566
13:22	385	1180	1593
13:26	389	1204	1625
13:36	391	1232	1690
13:41	391	1259	1694
13:46	391	1290	1710
13:50	394	1338	1720
13:55	396	1349	1729
14:00	397	1355	1744
14:10	401	1362	1753

Таблица 4.9. Результаты средней выходной мощности для гибридной солнечно-ветровой системы в июне месяце.

Время	Мощность (Вт)		
	Ветроагрегат	Солнечные панели	Гибридная установка
8:15	373.76	1003.33	1337.96
8:24	335.24	998.34	1395.90
8:30	401.99	1000.79	1486.04
8:35	474.15	1015.12	1415.00
8:48	407.88	1087.19	1463.60
9:00	483.76	1066.07	1558.88
9:12	363.31	1087.30	1440.21
9:22	393.53	1095.68	1496.74
9:40	376.73	1109.49	1499.19
9:53	389.58	1112.89	1528.96
10:00	464.70	1142.07	1587.53
10:15	402.44	1163.31	1555.57
10:36	392.94	1129.56	1570.08
10:44	339.30	1105.50	1496.87
10:53	301.39	1195.12	1448.87
11:01	293.39	1172.55	1418.82
11:10	307.15	1163.11	1511.89
11:28	341.47	1154.62	1517.75
11:37	356.59	1163.01	1524.76
11:45	368.99	1178.83	1537.36
11:54	375.95	1200.59	1556.97

12:03	376.11	1213.43	1579.38
12:20	391.40	1215.87	1622.80
12:38	427.08	1204.42	1653.62
12:55	445.08	1221.19	1673.22
13:04	452.04	1234.03	1695.63
13:13	464.44	1227.56	1718.04
13:31	482.45	1247.31	1760.06
13:57	508.77	1267.05	1799.28
14:06	538.85	1266.52	1827.29
14:32	569.25	1288.71	1877.72
14:41	566.69	1292.64	1876.32
14:58	593	1287.02	1902.93

Таблица 4.10. Результаты средней выходной мощности для гибридной солнечно-ветровой системы в июле.

время	Мощность (Вт)		
	Ветроагрегат	Солнечные панели	Гибридная установка
7:44	227	466	700
8:49	347	454	761
8:55	148	472	699
9:00	370	461	585
9:06	200	492	648
9:16	268	498	716
9:24	194	501	649
9:27	280	499	637

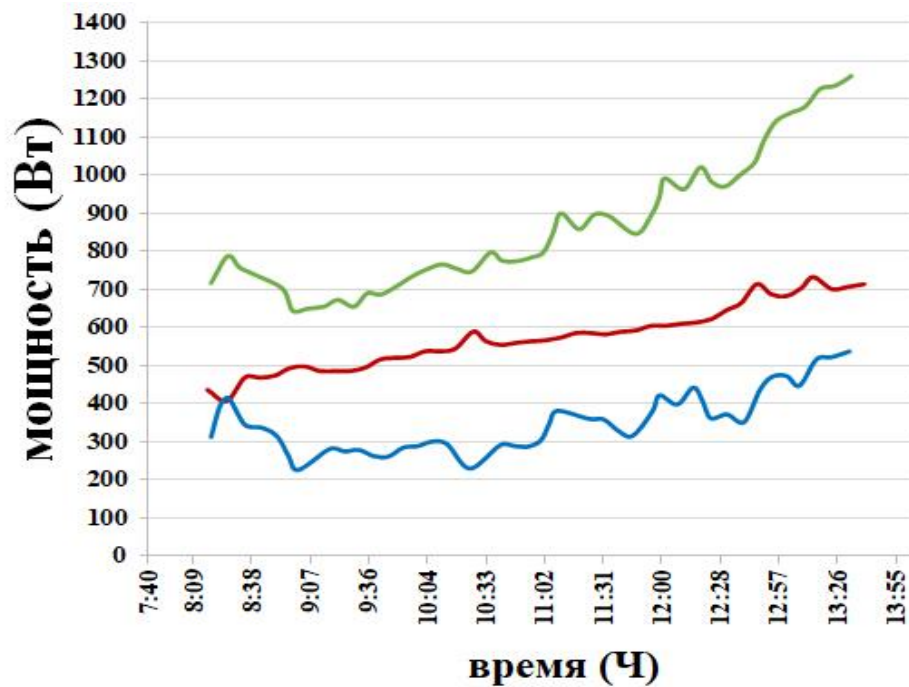
9:30	291	527	740
9:37	337	530	797
9:44	139	542	700
9:57	235	502	723
10:01	420	542	877
10:11	151	537	826
10:19	173	543	713
10:22	350	554	841
10:29	163	552	679
10:36	316	566	818
10:43	271	561	839
10:50	294	583	873
10:56	356	587	760
10:59	243	601	726
11:04	181	613	907
11:10	368	613	749
11:13	334	636	981
11:17	431	574	840
11:21	272	665	868
11:32	312	668	1005
11:35	255	551	999
11:41	443	608	1102
11:45	540	710	1068
11:52	438	722	1190
11:55	648	609	1167
12:02	506	734	1145
12:06	467	751	1250

12:13	677	689	1091
12:16	393	768	1239
12:19	513	797	1302
12:27	615	808	1205
12:30	519	826	1364
12:39	508	792	1274
12:44	471	791	1240
12:47	599	837	1388
12:51	644	814	1388
13:16	532	880	1300
13:24	371	781	1201
13:31	436	870	1254
13:40	371	886	1201
13:46	450	919	1401
14:01	535	1034	1303
14:15	414	860	1359
14:29	456	939	1339
14:37	397	873	1296
14:44	492	932	1398
14:52	397	945	1339
14:58	479	950	1503
15:06	584	960	1346
15:12	509	980	1451
15:25	581	990	1464
15:35	590	1000	1546

Таблица 4.11. Результаты средней выходной мощности для гибридной солнечно-ветровой системы в августе.

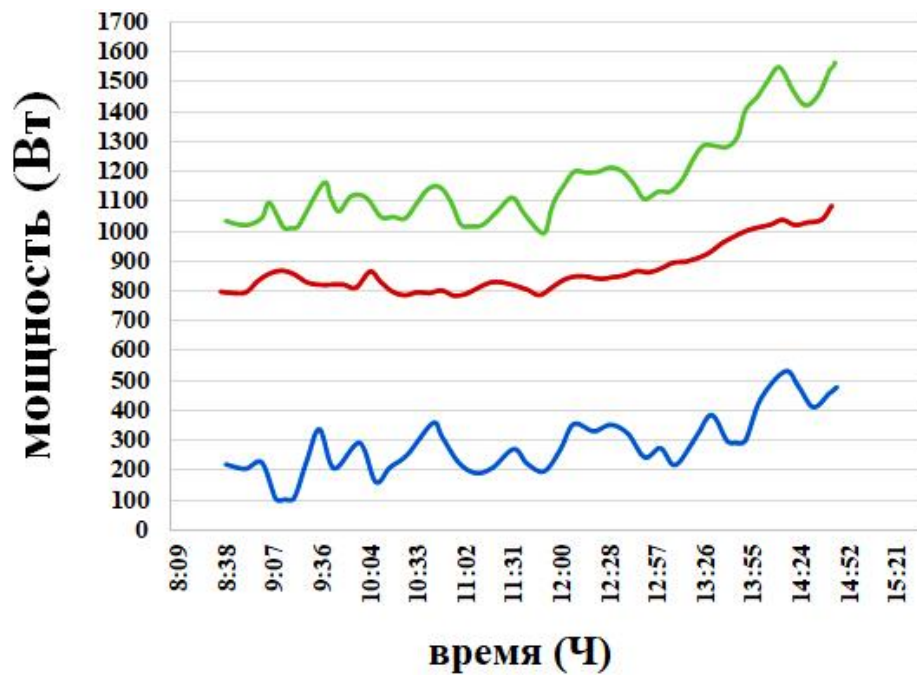
время	Мощность (Вт)		
	Ветроагрегат	Солнечные панели	Гибридная установка
8:48	320	630.6	903.8
8:56	334	612.5	901.53
9:03	350.7	594	901.53
9:10	380.7	563	901.53
9:17	420.7	525	928.74
9:24	440.7	519	944.86
9:31	429	527	962.54
9:47	486.73	648.3	1114.71
9:53	447.39	596.8	1044.8
9:59	409.38	559	954.8
10:07	435.72	523	945
10:14	455.72	606	952.6
10:21	470.72	695	1166.6
10:28	472.39	673	1157
10:42	502.4	625	1150.32
10:49	525.71	733	1302
10:56	524	739.8	1312
11:03	504	734.6	1306.8
11:10	480.72	661	1168.7
11:17	465.72	681	1168.25
11:31	370.7	780	1184

11:39	308.4	787.8	1136.88
11:46	360.8	779	1072.9
11:53	412	735	1143.6
12:00	435.83	739	1193
12:07	475.8	728	1231
12:14	510.72	710	1276.4
12:21	525.72	706	1280.32
12:28	544	706	1315.06
12:35	537.4	713	1323.65
12:42	508.379	727.13	1302.43
12:56	574	726.8	1372.22
13:03	585.7	706.	1348.5
13:12	548	760.5	1390.9
13:18	582.4	803.34	1524.6
13:32	649.72	823	1587
13:39	617.38	847.8	1636.32
13:46	605.7	88	1656.87
13:53	617.4	930	1697
14:06	727	981.55	1842.90
14:14	897	992.2	2119.8
14:25	775	1072.9	2145.5
14:30	841	1157	2176.3
14:41	992	1126	2303.7
14:45	1063	1151	2301.6
14:57	1030	1253.72	2290



— солнечные панели — гибридная — ветряноагрегат

Рисунок 4.09. Мощность, вырабатываемая гибридной солнечной и ветровой системой в разные часы в марте (Г. Аль-Наджаф в Ираке)



— солнечные панели — гибридная — ветряноагрегат

Рисунок 4.10. Мощность, вырабатываемая гибридной солнечной и ветровой системой в разные часы в апреле (Г. Аль-Наджаф в Ираке)

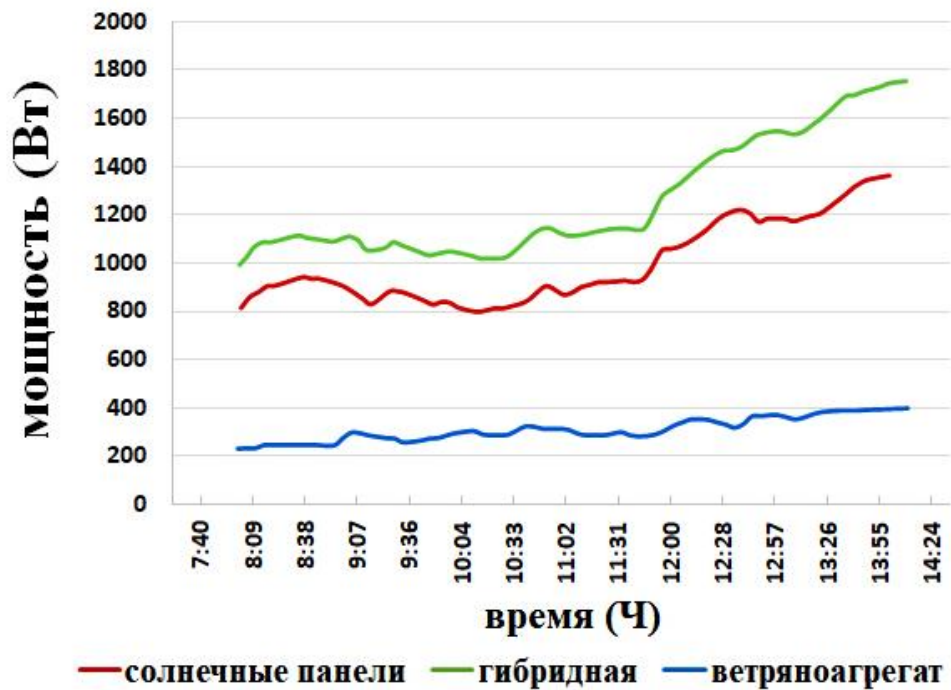


Рисунок 4.11. Мощность, вырабатываемая гибридной солнечной и ветровой системой в разные часы в мае (Г. Аль-Наджаф в Ираке)

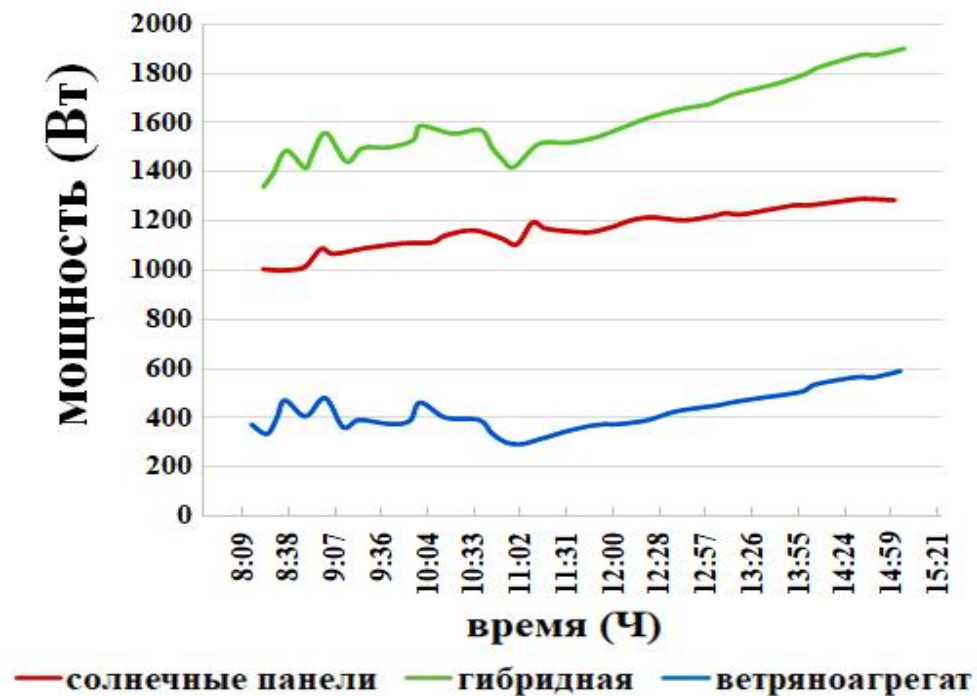


Рисунок 4.12. Мощность, вырабатываемая гибридной солнечной и ветровой системой в разные часы в июне (Г. Аль-Наджаф в Ираке)

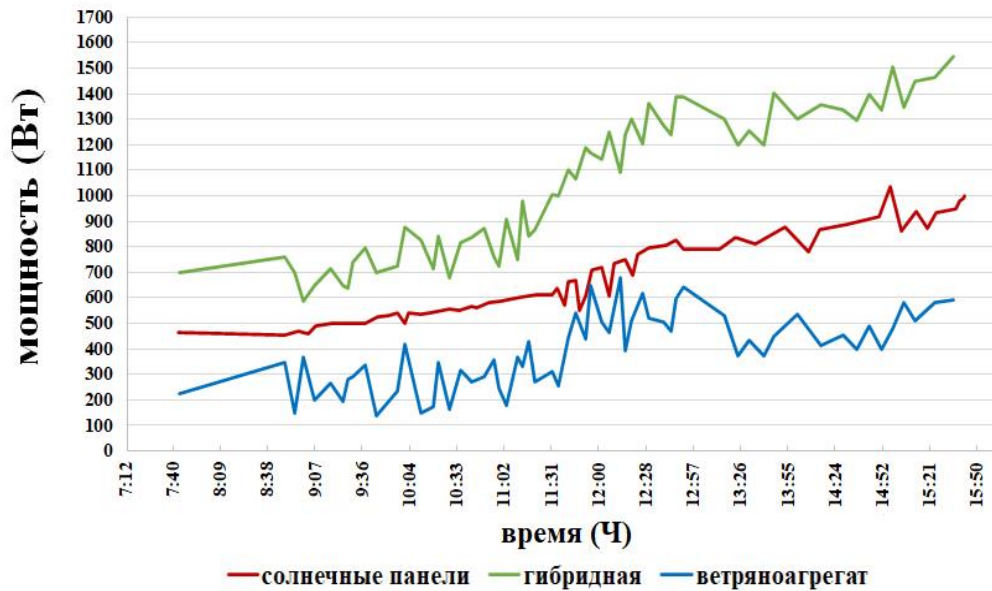


Рисунок 4.13. Мощность, вырабатываемая гибридной солнечной и ветровой системой в разные часы в июле (Г. Аль-Наджаф в Ираке)

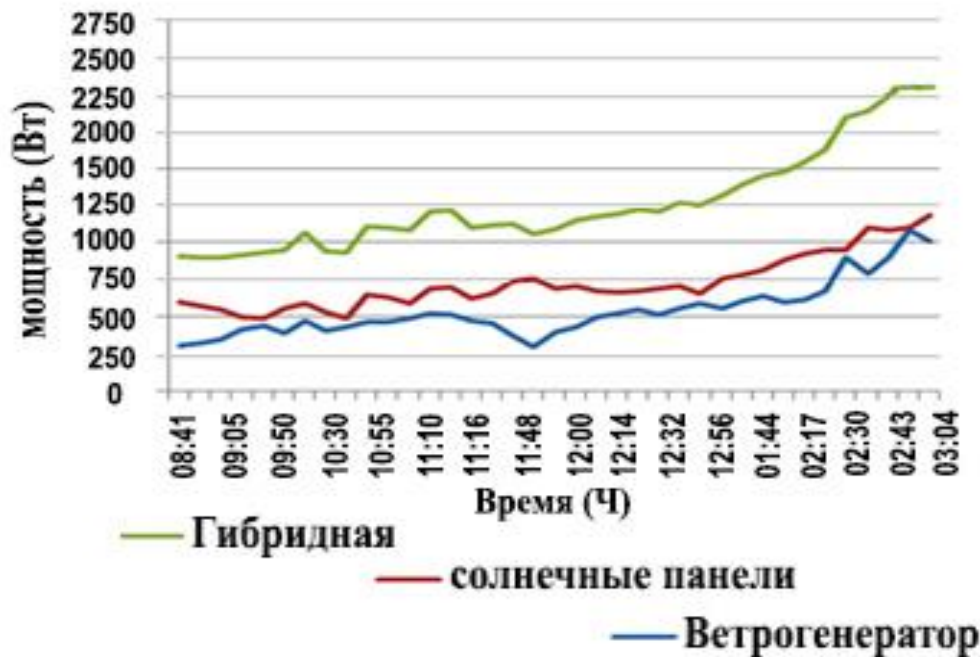


Рисунок 4.14. Мощность, вырабатываемая гибридной солнечной и ветровой системой в разные часы в августе (Г. Аль-Наджаф в Ираке)

Графики показаны на рисунках 4.9, 4.10, 4.11, 4.12, 4.13 и 4.14, и в таблицах с 4.7 по 4.12 показывают в целом сравнение выходной мощности. При одинаковых погодных условиях наблюдается разница в энергии, вырабатываемой гибридной

системой, с энергией, вырабатываемой от ветровых турбин отдельно или от солнечных батарей отдельно. Видно, что выходная мощность значительно увеличивается при наличии гибридной системы. Кроме того, выходная мощность гибридной системы непрерывна, в отличие от индивидуальной системы. Когда нет ветра, мощность не падает до нуля, как в отдельной системе, потому что есть другой источник входной мощности, а именно солнечная энергия, и верно обратное, мощность просто уменьшается. На этапе реализации, реализация проекта началась со строительства ветряных турбин. Затем следуют соединения солнечных панелей. После этого создается гибридная система и проводится с ней тестирование, как показано на рисунке 4.15.а. и 4.15.б.



Рисунок 4.15.а. Измерение выходной мощности для гибридных (солнечно-ветровых) систем.



Рисунок 4.15.б. Испытания предлагаемого алгоритма инкрементной проводимости (ИП)

Все данные и результаты, полученные нами в результате эксперимента приведённые в таблице 4.12 и рисунке 4.16, были записаны для гибридной системы, использующей ветровую турбину с 12 солнечными панелями. Получаем, что вклад солнечных панелей в марте составил около 66,1% для сравнения, ветровое турбины - около 33,9% от генерируемой энергии в гибридную систему, в апреле вклад солнечных панелей составлял около 76%, а ветровой турбины - около 23%. Кроме того, вклад ветровой турбины составил около 21,1%, в то время как солнечные панели составляли около 78,9% от вырабатываемой энергии в гибридную систему в мае, также в июне вклад солнечных панелей составил около 71,9%, в то время как ветровая турбина составляла около 28,1%, в то время как вклад ветровой турбины около 35,9% по сравнению с солнечными панелями, которые составляли около 64,1 в июле. Наконец, в августе вклад солнечных панелей составил около 58,4%, а ветряных турбин - около 41,6% вырабатываемой энергии в гибридную систему.

Таблица 4.12. Соотношение солнечной энергии и энергии ветра для гибридной системы за несколько месяцев.

месяц	Ветроагрегат %	солнечные панели %
Март	34	66
Апрель	23	76
Мая	21.1	78.9
Июнь	28.1	71.9
Июль	35.9	64.1
Август	41.6	58.4

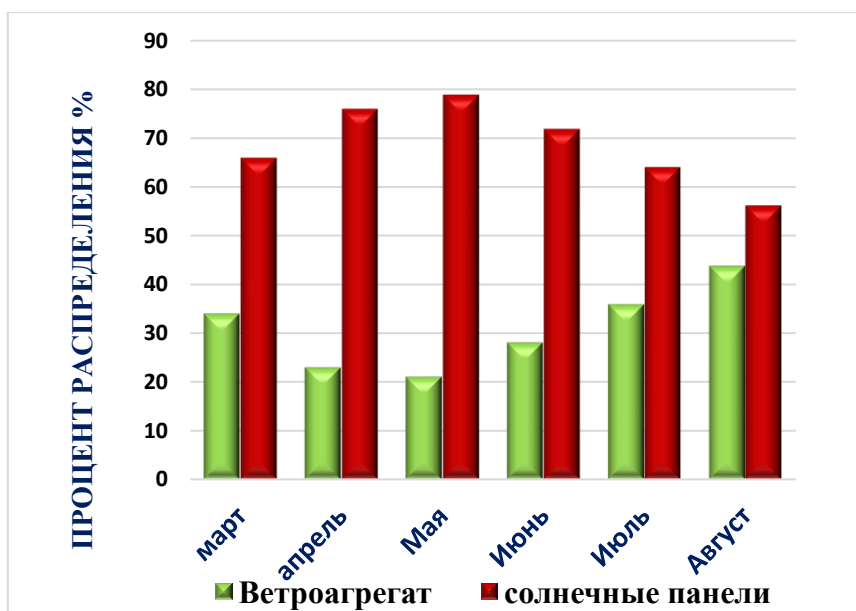


Рисунок 4.16. Соотношение преобразования солнечной энергии и энергии ветра для гибридной системы за несколько месяцев на площадке Аль-Наджаф.

Используя модифицированный алгоритм ИП для системы, представленный во второй части работы на солнечной панели LDK 180D-24(s), доказано, что как напряжение, так и ток увеличиваются по мере увеличения солнечной мощности. Отсюда следует, что при проверке того, достигнута ли ТММ и увеличиваются ли

напряжение и ток, может быть обнаружено неожиданное увеличение солнечной мощностью. Соответственно фиксируется допустимая ошибка, равная 0,065.

Можно увидеть влияние предложенного алгоритма ИП для солнечной панели и влияние предложенного алгоритма для ветряной турбины на нашу гибридную систему, как показано на рисунках 4.17-4.22.

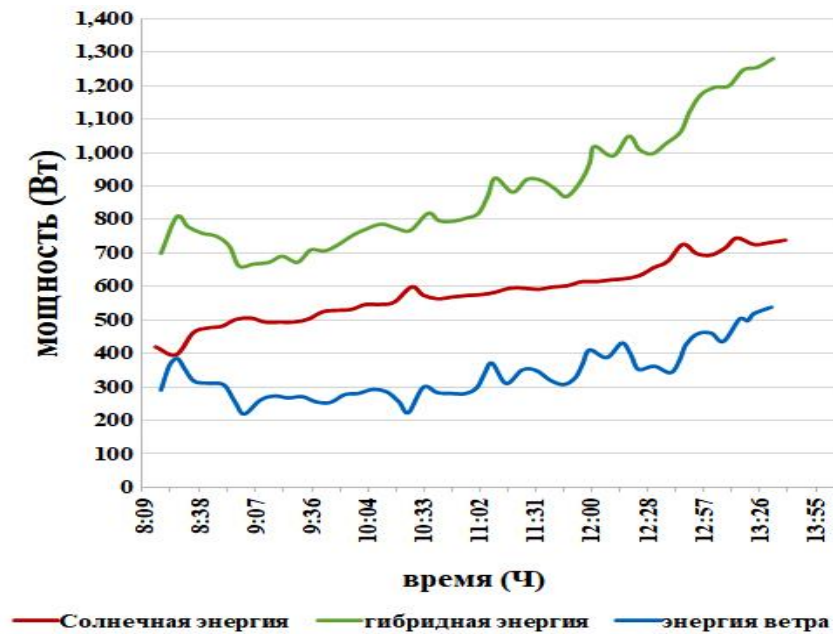


Рисунок 4.17. Мощность, вырабатываемая гибридной солнечной и ветровой системой, в разные часы в марте с использованием предлагаемых алгоритмов (г. Аль-Наджаф в Ираке)

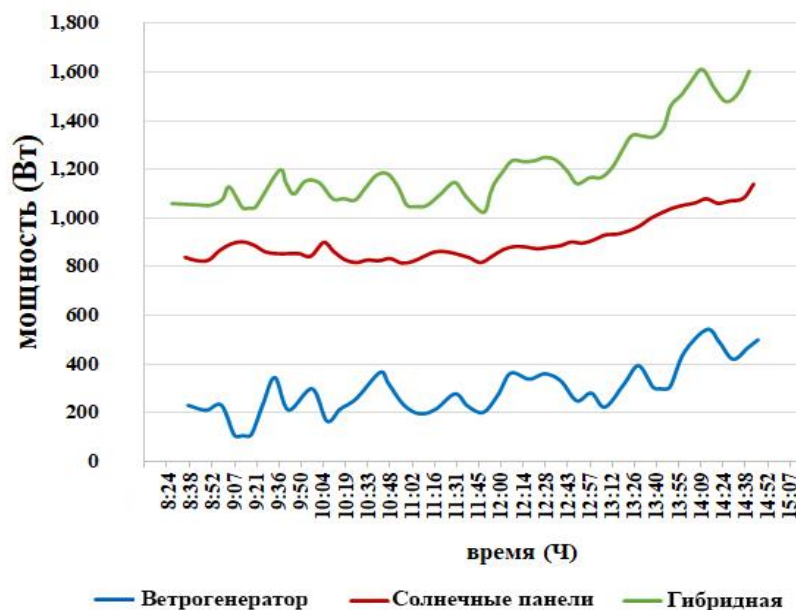


Рисунок 4.18. Мощность, вырабатываемая гибридной солнечной и ветровой системой в разные часы в апреле с использованием предлагаемых алгоритмов (г. Аль-Наджаф в Ираке)

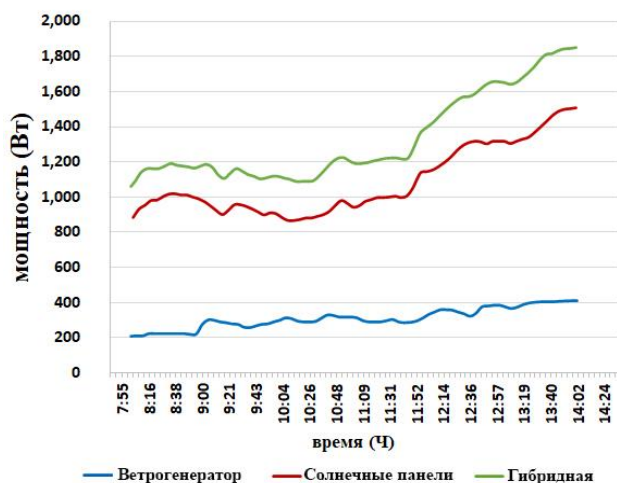


Рисунок 4.19. Мощность, вырабатываемая гибридной солнечной и ветровой системой в разные часы в мае с использованием предлагаемых алгоритмов (г. Аль-Наджаф в Ираке)

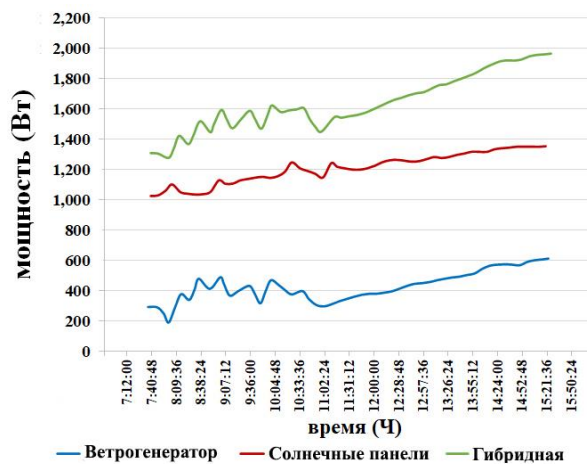


Рисунок 4.20. Мощность, вырабатываемая гибридной солнечной и ветровой системой в разные часы в июне с использованием предлагаемых алгоритмов (г. Аль-Наджаф в Ираке)

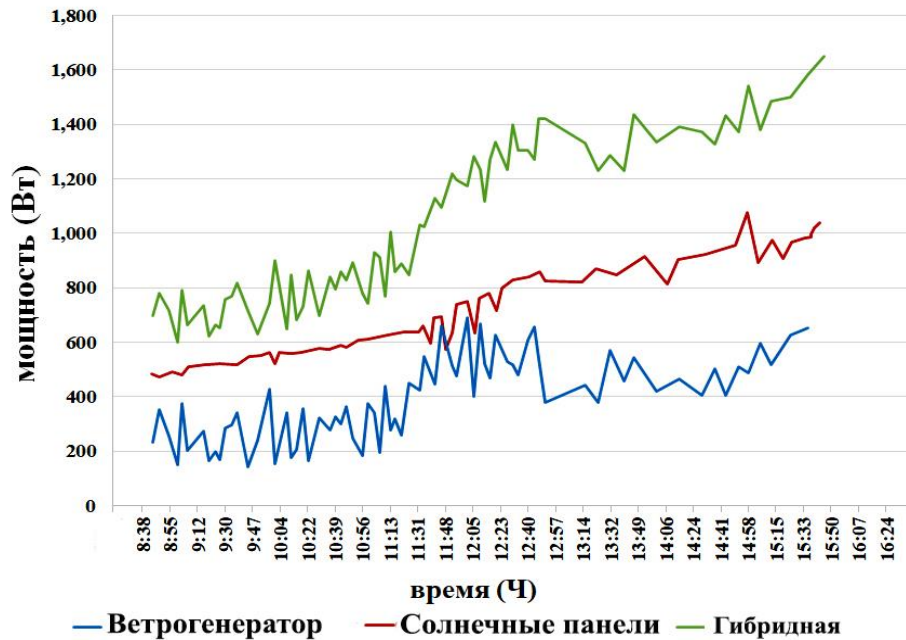


Рисунок 4.21. Мощность, вырабатываемая гибридной солнечной и ветровой системой в разные часы в июле с использованием предлагаемых алгоритмов (г. Аль-Наджаф в Ираке)

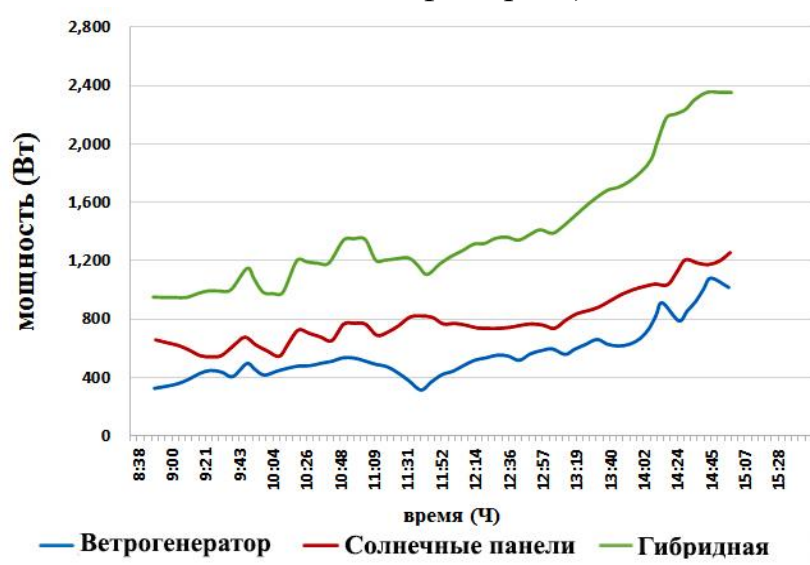


Рисунок 4.22. Мощность, вырабатываемая гибридной солнечной и ветровой системой в разные часы в августе с использованием предлагаемых алгоритмов (г. Аль-Наджаф в Ираке).

В таблице 4.13 и рисунке 4.23 показаны сравнение результатов средней выходной энергии для гибридной ветро-солнечной системы с использованием и без

использования предлагаемых алгоритмов для времени испытаний с 8:10 до 16:00 в течение 6 месяцев.

Таблица 4.13. Сравнения результатов средней выходной энергии для гибридной системы с использованием предлагаемых алгоритмов и без предлагаемых алгоритмов.

Месяц	гибридная энергия после повышения эффективности (кВт·ч)	гибридная энергия перед повышением эффективности (кВт·ч)
март	179.81	163.46
апрель	273.09	246.03
Мая	315.86	284.56
Июнь	375.11	336.42
Июль	318.28	286.74
Август	296.07	269.16

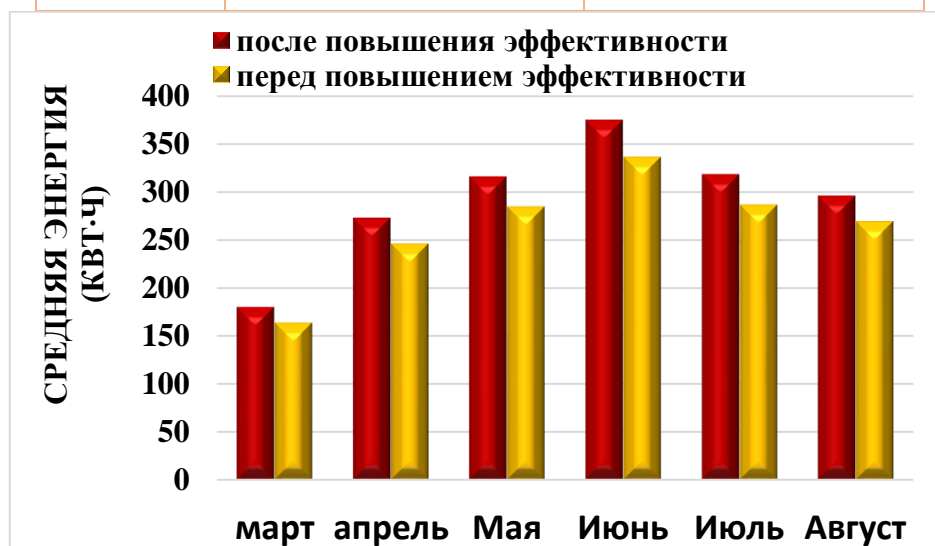


Рисунок 4.23. Сравнения результатов средней выходной энергии для гибридной ветро-солнечной системы с использованием и без использования предлагаемых алгоритмов (Г. Аль-Наджаф в Ираке).

4.5 Техничко-экономическая оценка автономной гибридной ветро-солнечной системы

Для автономных потребителей гибридная система энергии (солнечная, ветровая с аккумуляторами) является более надежным, экономичным и жизнеспособным вариантом для их расширения. В этом исследовании разработана модель гибридной фотоэлектрической/ветровой/аккумуляторной системы для оценки оптимального количества фотоэлектрических модулей, ВЭУ и аккумуляторов. Предлагаемая модель применяется к сельскохозяйственным районам, удаленным от сети, где нет электричества. Для этого была проведена сравнительная методика с модифицированными алгоритмами и традиционными методами для гибридной системы. Сравнительный результат показал, что модифицированная система более эффективна, так как требует меньше времени на моделирование, дает более точные результаты, большую гибкость в выборе управления и облегчает разработку собственной модели, в результате значительно снижается общая себестоимость. Наконец, смоделированная производительность всей системы и анализ чувствительности выполняются при различном использовании ресурсов, где нормированная стоимость энергии LCOE.

В целом, снижение стоимости производства электроэнергии от возобновляемых источников энергии, таких как солнечные панели и ветровые турбины, а также с использованием аккумуляторных батарей, зависит от ряда факторов, наиболее значимыми из которых являются снижение стоимости производства оборудования, снижение затрат на строительство, эксплуатацию, затраты на техническое обслуживание, наличие запасных материалов и снижение налогов на оборудование возобновляемой энергии, которое используется в солнечных станциях, ветровых электростанциях, в дополнение к поддержке, полученной от страны в области быстрого технологического развития.

При расчете тарифа по договору купли-продажи электроэнергии должны учитываться как капитальные затраты ($C_{\text{оскз}}$), так и эксплуатационные расходы, а также годовая выручка станции, ежегодные налоговые платежи, амортизация, а также платежи по долгам. Кроме того, конкретно для иракского рынка существует специальный стимул, заключающийся в снижении налоговых обязательств в течение первого года работы на 5%. В проектах по возобновляемым источникам энергии, таких как ветровая и солнечная энергия, средний мировой показатель LCOE снизился в период с 2010 по 2021 год, как показано на следующем рисунке [111].

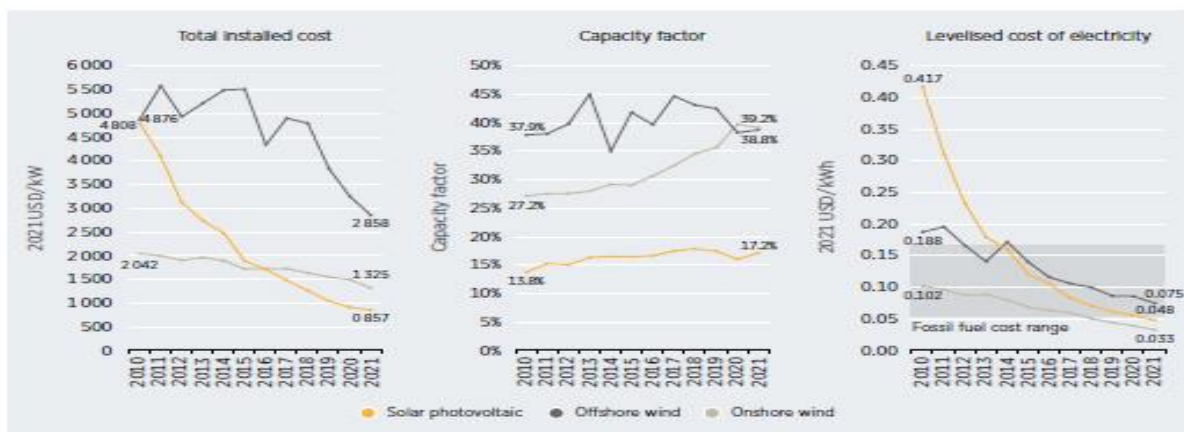


Рисунок 4.24. Средние затраты на установку, приведенная стоимость энергии и коэффициенты мощности солнечных электростанций и ветряных электростанций за период с 2010 по 2021 год.

Чистый дисконтированный доход (NPV) представляет собой отклонение между приведенной стоимостью ежегодных притоков денежных средств (выгод) и приведенной стоимостью ежегодных оттоков (расходов). Весь жизненный цикл проекта NPV можно выразить следующим образом:

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{C(t)}{(1+d)^t} - C_{\text{оскз}} \quad (4.2)$$

где $C_{\text{оскз}}$ и T — общая стоимость капитальных затрат и экономический срок службы гибридной ветро-солнечной системы, соответственно, d — годовая ставка дисконтирования, а $C(t)$ — чистый приток денежных средств за год. Чистый денежный поток за год находится путем вычитания чистой приведенной стоимости оттоков из чистой приведенной стоимости годовых притоков денежных средств, как показано в уравнении 4.3. Оттоки соответствуют операционным расходам в соответствующем году, а притоки связаны с $C(t)$ соответствующего года. Финансовый вариант исследуемой электростанции становится экономически выгодным при положительных значениях NPV [111].

$$C(t) = C_{\text{ПДС}} - C_{\text{рас.}} \quad (4.3)$$

где

$C_{\text{ПДС}}$ — приток денежных средств от продажи выработанной электроэнергии (\$) и $C_{\text{рас.}}$ — денежные расходы (\$) [111].

$$C_{\text{ПДС}} = \mathcal{E}_{\text{Гибридный}} \times \mathcal{E}L_{\text{Цена электроэнергии}} \quad (4.4)$$

$\mathcal{E}L$ — Цена электроэнергии (\$/кВтч).

Генерируемая мощность гибридных ветро-солнечных модулей ($P_{\text{гибрид}}$) зависит от энергии ветра и солнца, которые зависят от солнечной радиации, температуры воздуха и скорости ветра, которая определяется соотношением $P_h = p_{\text{солнечная}} + p_{\text{ветровая}} + p_{\text{батарея}}$

$$\mathcal{E}_{\text{ГЭС}} = \mathcal{E}_{\text{ФЭУ}} + \mathcal{E}_{\text{ВЭУ}} + \mathcal{E}_{\text{Бат.}} \quad (4.5)$$

Дисконтированный период окупаемости (DPP) часто используется в исследованиях возобновляемых источников энергии, чтобы найти время, необходимое для возврата первоначальных инвестиций. Дисконтированный срок окупаемости, указанный в уравнении 4.5, был использован для предварительной оценки устойчивости вариантов модели. Этот метод дает количество лет

безубыточности путем сравнения годовой экономии энергии с первоначальными инвестициями с учетом временной стоимости денег.

$$DPP = \text{минимальная} T \sum_{t=1}^T \frac{C_{ПДС} - C_{рас.}}{(1+d)^t} \cdot C_{ОСКЗ} \quad (4.6)$$

и можно писать так

$$DPP = \frac{\ln \left(\frac{1}{1 - \frac{d \cdot C_{ОСКЗ}}{C(t)}} \right)}{\ln(1+d)} \quad (4.7)$$

Нормированная стоимость энергии (LCOE)— это специальный показатель стоимости единицы продукции, который представляет собой чистую текущую стоимость электростанции на протяжении всего срока ее службы и рассчитывается по формуле [111]:

$$LCOE = \frac{\text{отток денежных средств за всю жизнь}(\$)}{\text{выработка электроэнергии за весь срок службы}(\text{кВт}\cdot\text{Ч})} \quad (4.8)$$

$$LCOE = \frac{\sum_{t=1}^T \frac{C_{ОСКЗ}(t) + C_{ЭР}(t)}{(1+d)^t}}{\sum_{t=1}^T \frac{C(t)}{(1+d)^t}} \quad (4.9)$$

где $C_{ЭР}(t)$ – эксплуатационные расходы за год t . Чистая $C(t)$ – расчетное количество энергии, вырабатываемой станцией за один год.

LCOE является одним из основных показателей, используемых для измерения экономической эффективности электростанций в отрасли. LCOE часто используется для сравнения различных энергетических технологий, даже если масштабы эксплуатации и уровень инвестиций различны.

Капитальные вложения в гибридную солнечно-ветровую станцию основаны на рыночной стоимости 2021 г. (2477 долл. США/кВт) [111]. В результате капитальные

затраты $C_{оскз}$ для исследуемой гибридной солнечной ветростанции установленной мощностью 3,9 кВт составляют:

$$C_{оскз} = 3,9кВт \cdot 2477 \frac{\$}{кВт} = 9660\$$$

$$C(t) = C_{пдс} - C_{рас}$$

$$C_{пдс} = 6350 \cdot 0.18 = 1143 \text{ \$/год}$$

Сумма эксплуатационных расходов и затрат на техническое обслуживание может быть взято из работы [111] или через рассчитанный процент от капитала, который оценивается между 1,5-2. Для Ирака выбираем процент 1,5.

$$C_{рас} = 9660 \cdot 0,015 = 145 \text{ \$/год}$$

Чистый приток денежных средств за год, рассчитанный по уравнению 4.2

$$C(t) = 1016 - 145 = 998$$

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{C(t)}{(1+d)^t} - C_{оскз}$$

$$NPV = \sum_1^{25} \frac{998}{(1+0.05)^1} - 9660$$

$$NPV = 4405,75 \$$$

Расчет приведенной стоимости строится в соответствии с уравнением (4.2), чтобы дать оценку того, как изменяется приведенная стоимость инвестиций. Был проведен полевой анализ для установки гибридной системы и получены результаты технико-экономического обоснования (см. рисунке 4.25). В следующих финансовых расчетах вероятное базовое значение.

Соответствующий представленный сценарий рассматривается посредством анализа приведенной стоимости и составляется диаграмма, описывающая изменение стоимости капитала за 25 лет. Результаты показаны на рисунке 4.25, а также можно увидеть разницу в стоимости при использовании модифицированной системы на рисунке 4.26.

Таблица 4.2. Значения, использованные для экономической оценки.

Установленная стоимость	2477	\$/кВт
Стоимость эксплуатации и обслуживания O&M	1.5% инвестиционная стоимость	кВт/год
Цена электроэнергии	0.18	\$/кВтч
Инвестиционная стоимость	2550	кВт
Ставка дисконтирования	5	%

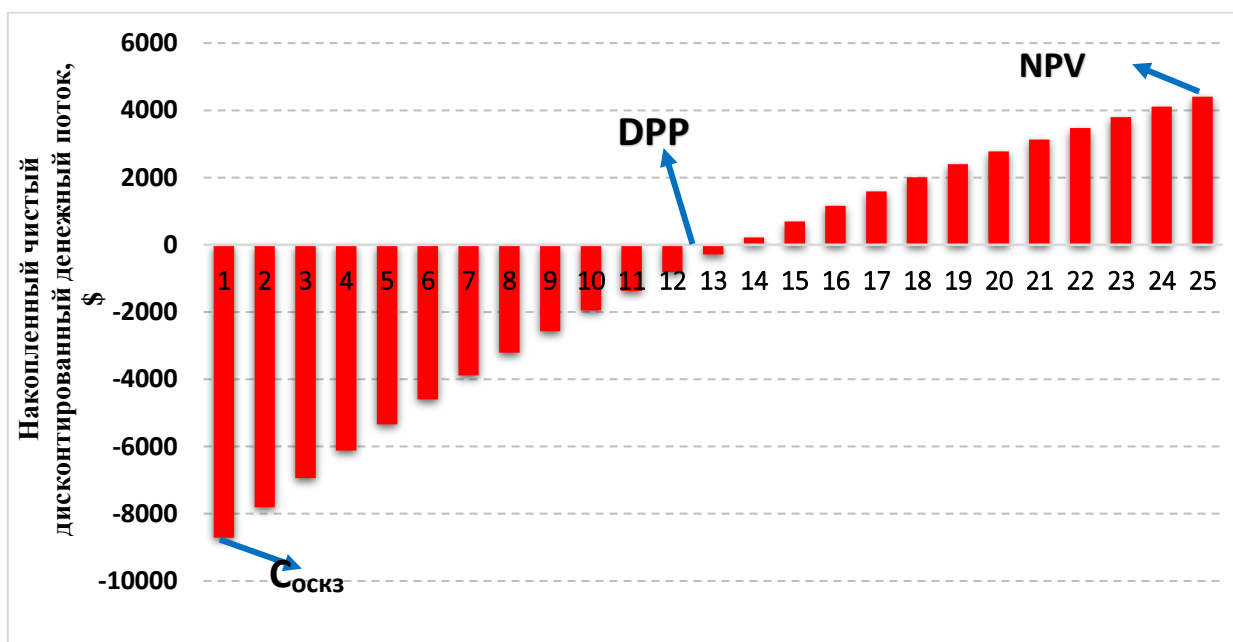


Рисунок 4.25. Технико-экономические результаты для гибридной ветро-солнечной установки с использованием традиционных алгоритмов.

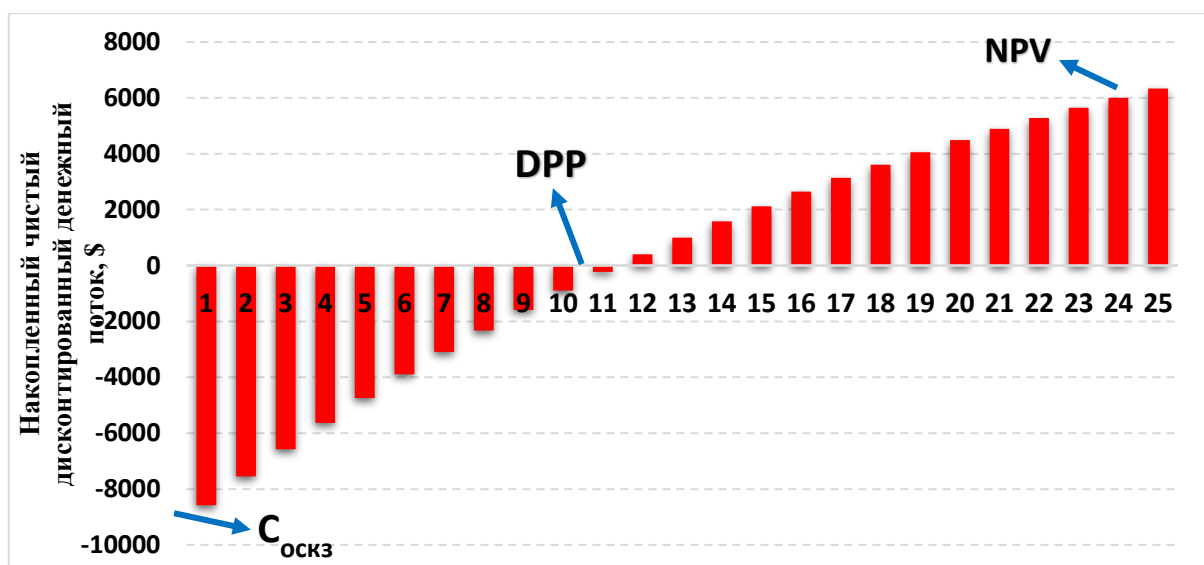


Рисунок 4.26. Технио-экономические результаты для гибридной ветро-солнечной установки с использованием модифицированных алгоритмов.

Стоимость капитала при ожидаемом сроке службы завода 25 лет составляет 8709,52 долларов США. С расчетной процентной ставкой 5%. При тех же условиях период оплаты для обычной гибридной ветро-солнечной системы составляет 13.5 лет, а для модифицированной системы — 11.5 лет. С учетом факторов (затраты на эксплуатацию и обслуживание и стоимость электроэнергии) вырабатываемая энергия напрямую зависит от интенсивности излучения, температуры и аномалий, таких как затенение и грязь. Грязь снижает эффективность системы генерации и сокращает срок службы модуля из-за аномального нагрева ячейки. Анализ показывает, что чистая приведенная стоимость инвестиций через 25 лет может колебаться от -14065 до 950 долларов в зависимости от цен на электроэнергию.

Если объект будет построен по традиционной модели, ожидается, что он будет вырабатывать около 6350 кВтч энергии в год, а по модифицированной модели — около 7112 кВтч.

$$LCOE_{\text{традиционный}} = \frac{\text{отток денежных средств за всю жизнь}(\$)}{\text{выработка электроэнергии за весь срок службы}(\text{кВт} \cdot \text{Ч})}$$

$$LCOE_{\text{традиционный}} = \frac{13285.3}{6350 * 25} = 0.084 \text{ \$/кВт} \cdot \text{ч}$$

$$LCOE_{\text{модифицированный}} = \frac{13285.3}{7112 * 25} = 0.075 \text{ \$/кВт} \cdot \text{ч}$$

Если объект будет построен по традиционной модели, ожидается, что он будет давать примерно 6350 кВтч энергии в год. LCOE оценивается в 0,083 \$ / кВтч, в то время как в модифицированной модели 7112 кВтч энергии в год с LCOE около 0,075 \$ / кВтч.

Выводы по главе 4

Исследование, представленное в этой главе направлено на экспериментальное изучение производительности гибридной системы, которая использует как солнечную, так и ветровую энергию в качестве возобновляемых источников. Было показано преимущество максимизации выходной мощности и сохранения постоянного источника питания. Экспериментальное исследование началось с изучения соединения двух источников вместе в разные месяцы. Выходная мощность измеряется выходным напряжением и током в течение нескольких дней. Перед тестированием гибридной системы были проведены индивидуальные исследования для солнечных панелей и ветровой турбины.

Результаты, полученные в течение нескольких дней эксперимента при различных погодных условиях, показали, что непрерывная и большая мощность вряд ли достигается только с помощью ветровой турбины. Результаты показали лучшую производительность при использовании большого количества солнечных панелей, потому что в городе Наджаф очень хорошая радиация, что означает, что мощность поступающего солнечного излучения в Наджафе больше, чем мощность ветрового потока.

Данные, которые были получены результате эксперимента (таблицы с 4.7 по 4.12), и результаты (с рисунков с 4.9 по 4.14) были записаны для гибридной системы с использованием ветровой турбины с 12 солнечными панелями. Это показало, что выходная мощность увеличилась на 12 % по сравнению с гибридными системами в целом, однако солнечная панель дает более высокую мощность при подключении к ветровой турбине. Кроме того, выходная мощность является непрерывной в гибридной системе по сравнению с отдельными солнечными системами, а также в гибридной системе выходная мощность была выше по сравнению с отдельными системами ветровых турбин.

Представлены сравнительные результаты LCOE гибридной ветро-солнечной системы для сельскохозяйственной зоны в городе Наджаф с использованием инструмента моделирования HOMER и с использованием математических уравнений. Конкретная информация о спросе на энергию и данные о солнечных и ветровых ресурсах используются для сравнения. Установлено, что определенная LCOE в размере 0,075 \$/кВтч для модифицированной гибридной системы лучше, чем LCOE для обычной гибридной системы, которая составляет 0,083 \$/кВтч. Другим объяснением может быть снижение инвестиций и эксплуатационных расходов.

1. Эффект масштаба: увеличение спроса на электроэнергию. Это снижает затраты на более высокие установки, поскольку затраты не зависят линейно от мощности.
2. Снижение производственных затрат: особенно в контексте производства аккумуляторов, фотоэлектрических систем и ветряных турбин цены снижаются ежегодно, что приводит к меньшим инвестиционным затратам для еще большего производства энергии. Кроме того, сравнительно дешевая рабочая сила предполагает низкие затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В ходе выполнения работы был разработан модифицированный алгоритм инкрементной проводимости для отслеживания точки максимальной мощности фотоэлектрического модуля при быстро меняющемся уровне солнечного излучения, который точно реагирует при увеличении уровня солнечного излучения. Чтобы улучшить экономичность и эффективность фотоэлектрических систем, предложен улучшенный алгоритм инкрементной проводимости для стратегии управления ТММ. Это не только оптимизирует систему, но также повышает энергетические характеристики, скорость отклика и эффективность отслеживания фотоэлектрической системы. Модифицированный алгоритм позволяет принимать правильное решение при внезапном изменении потока солнечной радиации, в отличие от традиционной методики, следовательно, потери энергии сводятся к минимуму, при этом выработка мощности фотоэлектрическими панелями и составляет до 98,5% от номинала вместо 94 %, получаемых по традиционной методике. Результаты моделирования и эксперимента показали, что предложенный алгоритм точно реагирует и отслеживает ТММ, обеспечивая тем самым стабильную работу энергосистемы, а также увеличивает выработку электроэнергии. Модифицированный метод отслеживания точки максимальной мощности улучшает эффективность отслеживания с 91,5% до 93,6% в условиях частичного затенения.

2. Предложен модифицированный алгоритм для отслеживания точки максимальной мощности для ветроэнергетических систем, который включает в себя как гистерезисное управление, так и управление отношениями линейной скорости вращения конца лопасти к ветровому потоку. Независимо от изменений скорости ветра предложенный механизм управления обладает улучшенными динамическими свойствами на C_p -кривой. Предлагаемый метод обеспечивает повышение производительности и стабилизирует скорость вращения ротора Ветроагрегат при увеличении скорости ветрового потока выше номинального,

кроме того, позволяет увеличить выработку электроэнергии. Эффективность предложенного алгоритма подтверждена моделированием и экспериментами на опытной гибридной системе и ее симуляционной модели. Использование предлагаемого метода показывает, что КПД точки максимальной мощности повышается примерно на 8 % по сравнению с типовым обычным TSR-методом. Поскольку ошибка параметра невелика, можно ожидать, что предлагаемый метод отслеживания точки максимальной мощности хорошо подходит для стабилизации системы.

3. Представленные результаты экспериментов, которые были получены в городе Наджаф при различных климатических условиях, показали возможность решения части энергетических проблем для различных территорий Ирака. Это особенно актуально в регионах, удаленных от покрытия линий электропередачи, таких как сельские районы. Все возникающие энергетические проблемы можно решить за счет использования гибридных ветро-солнечных установок. В городе Наджаф высокий уровень солнечной радиации и хорошие скорости ветра, которые позволяют использовать гибридные энергетические системы.

Данные и результаты, которые были получены в результате эксперимента, были применены для гибридной системы с использованием ветровой турбины 1800 Вт с 12 солнечными панелями (LDK 180D-24(s)). Это показало, что большая часть выработки мощности, например, в мае, поступает от солнечных батарей, которая составляет 78,9%, а выработка мощности от ветровых турбин – 21,1%. Также показано, что выходная мощность для гибридных систем в целом увеличилась. Кроме того, выходная мощность является непрерывной и выше в гибридной системе по сравнению с отдельными солнечными системами и с отдельными системами ветровых турбин.

4. В работе была предложена и смоделирована гибридная ветро-солнечная энергетическая система, которая повысила эффективность на 12%, с

использованием предлагаемого алгоритма, что позволяет сделать систему более надежной, эффективной и на более стабильной.

5. В результате выполненных исследований созданы компоненты гибридной ветро-солнечной электростанции и определены ее оптимальные технические характеристики, что позволяет внедрять разработки в Севастополе и Ираке.

Рекомендации по использованию материалов исследования

Согласно направлению исследований для Ирака, цель состоит в том, чтобы к 2025 году в энергетическом комплексе было использовано не менее 30% энергии от возобновляемой энергетики. Ниже приведены следующие рекомендации для развития состояния энергетики:

1. Производство электроэнергии возможно осуществлять при помощи гибридных ветро-солнечных систем. Предложенные конструкции подходят для климатических условий Ирака и стран с жарким климатом. Материалы, приведенные в исследовании, позволят инвесторам и правительству оценить потенциальные возможности развития различных секторов возобновляемой энергетики в Ираке.

2. Создание благоприятной инвестиционной среды будет содействовать переходу частного сектора к производству и использованию возобновляемых источников энергии. При этом необходимо предусмотреть различные инвестиционные льготы, конкурентоспособные льготные тарифы и налоговые льготы на приобретение оборудования для развития возобновляемых источников энергии.

3. В условиях действующей опытной фотоэлектрической электростанции в Республике Ирак необходимо провести исследования, которые должны быть направлены на снижение стоимости электроэнергии и увеличение выработки

электроэнергии на 12%, а также на снижение себестоимости производства электроэнергии.

4. Оптимизация гибридных систем возобновляемой энергетики в этом исследовании может быть использована для покрытия потребности в энергии жилых домов, находящихся вдали от электрической сети, или для освещения улиц, чтобы стимулировать инвестиции в возобновляемые источники энергии в Ираке. В соответствии с этим и потребителями будущие исследования могут быть исследованы, чтобы избежать растраты энергии с точки зрения удовлетворения спроса на жилье, а также тестирования различных сценариев ценовой политики, таких как «зеленые» тарифы и покупка электроэнергии у домохозяйств, которые используют возобновляемые технологии.

5. Большинство из этих предложений направлены на повышение эффективности и увеличение общей выработки энергии. Среди них, помимо создания прототипа оборудования, будут востребованные системы мониторинга фотоэлектрических и ветровых турбин. Владельцы фотоэлектрических панелей или ветроэнергетических систем должны быть уверены, что их системы работают без сбоев и что их инвестиции окупятся. Независимо от того, какую систему они эксплуатируют: парки предприятий, отдельные системы или частные системы, сбои и дефекты должны быть обнаружены и устранены немедленно. Этого можно достичь путем оптимизации производительности системы на ранней стадии и устранения любого ухудшения качества.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования

Выполненное исследование в будущем может быть направлено на улучшение оценки состояния ветровых и солнечных ресурсов в Ираке.

1. В этой диссертации был предложен новый подход к мониторингу фотоэлектрической системы путем расчета остаточной разницы между прогнозируемыми моделью и фактическими измеренными параметрами мощности. Однако этот подход можно улучшить за счет внедрения искусственного интеллекта.

Модель нейронной сети с прямым и обратным распространением можно обучить для прогнозирования генерируемой мощности фотоэлектрических или ветровых турбин. Затем остаточную разницу можно рассчитать с помощью датчиков и микроконтроллера.

2. Можно рассмотреть возможность использования другого источника энергии (например, отопления с использованием систем накопления тепла) с точки зрения получения преимуществ при достижении высоких температур летом и интеграции этой технологии вместе с ветровой и солнечной энергией в условиях крупных электроэнергетических систем.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

PV -	Фотоэлектрическое преобразование
TMM -	Точка максимальной мощности
ВИЭ -	Возобновляемые источники энергии
ВАХ-	вольтамперная характеристика.
ИП (IC) -	Метод инкрементной проводимости
(P&O) -	Метод возмущения и наблюдения
(НС) -	Восхождения на холм
УТГ -	Уровень технологической готовности
СГПМ -	Синхронный генератор с постоянными магнитами
КПД -	Коэффициент полезного действия
НОMER-	Программа гибридной оптимизации и моделирования возобновляемой электрической энергии
SOC-	Состояние зарядки
БТИЗ (IGBT)-	Биполярный транзистор с изолированным затвором
ВЭУ-	Ветроэлектрическая установка
ВЭС-	Ветроэлектрическая станция
СНЭБ (BESS) -	Система накопления энергии батареи
(DOD) -	Глубина разряда
СТС-	Стандартное тестовое состояние
КБ (TSP)-	Коэффициент быстроходности
ГС-	Гибридная система
NPV-	Чистый дисконтированный доход
DPР-	Дисконтированный срок окупаемости
LCOE-	Нормированная стоимость энергии

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yang H., Wei Z., Chengzhi L. Optimal design and techno-economic analysis of a hybrid solar-wind power generation system // *Applied Energy*. 2009. Vol. 86. Issue 2. P.163-169.
2. Shakya BD., Aye L., Musgrave P. Technical feasibility and financial analysis of hybrid wind-photovoltaic system with hydrogen storage for Cooma // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2005. Vol. 30. Issue 1. P. 9-20.
3. Ekren O., Ekren BY., Ozerdem B. Break-even analysis and size optimization of a PV/wind hybrid energy conversion system with battery storage – a case study // *Applied Energy*. 2009. Vol. 86. Issues 7–8. P.1043–1054.
4. El-Shatter TF., Eskander MN., El-Hagry MT. Energy flow and management of a hybrid wind/PV/fuel cell generation system // *Energy Conversion and Management*, 2006. Vol. 47. Issues 9–10. P. 1264-1280.
5. Reichling JP., Kulacki FA. Utility scale hybrid wind-solar thermal electrical generation: a case study for Minnesota // *Energy*. 2008. Vol. 33. Issue 4. P. 626-638.
6. Гимазов Р. У., Шидловский С. В. Применение аппарата нечёткой логики для улучшения свойств МРРТ алгоритма возмущение-наблюдение // *молодежь и современные информационные технологии*. 2016. С. 157-158.
7. Тарола Дмитрий Игоревич. Моделирование МРРТ-контроллера // *студент года*. 2020, С. 361-369.
8. Попов С. А., Кривченков В. И., Ивашкин И. И. Методы определения точки максимальной мощности фотоэлектрического модуля // *Электронный сетевой политематический журнал научные труды КубГТУ*. 2021. Vol.4. С.146-154.
9. Кувшинов В. В. Гусева Е. В., Березняк В. А., Тиман Д.И., Ивантеев И.С. Возможности повышения эффективности электрогенерации фотоэлектрических модулей // *Естественные и технические науки*. 2022. – № 5(168). – С. 266-268.

10. Буяльский В. И., Шайтор Н. М., Якимович Б. А. Оптимальное управление ветроэнергетической установкой // Интеллектуальные системы в производстве. 2018. Т. 16. № 3. С. 70-77.
11. Бекиров Э. А., Сокут Л. Д., Муровская А. С. Анализ систем регулирования мощных ветроэлектроустановок подключаемых в общую энергосистему // Строительство и техногенная безопасность. 2018. № 10(62). С. 167-177.
12. Якимович Б. А., Какушина Е. Г., Крастелев О. М. Геотермальные источники - путь к энергосбережению и снижению загрязнения окружающей среды // Энергетические установки и технологии. 2022. Т. 8. № 4. С. 50-53.
13. Кузнецов П. Н., Чебоксаров В. В., Якимович Б. А. Гибридные ветро-солнечные энергетические установки // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2020. Т. 23. № 1. С. 45-53.
14. Kazem Hussein A., Miqdam T. Chaichan. Status and future prospects of renewable energy in Iraq // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2020. Vol.16. No. 8. P.6007-6012.
15. Кувшинов В. В., Бекиров Э. А., Гусева Е. В. Использование фотоэлектрических модулей с двухсторонней приёмной поверхностью для установок малой генерации // Строительство и техногенная безопасность. 2021. № 20(72). С. 93-100.
16. Hamilton N., Viggiano B., Calaf M., Tutkun M., Cal, R. B. A generalized framework for reduced-order modeling of a wind turbine wake // Wind Energy. 2018. Vol. 21(6). P. 373–390.
17. ЕС 2016 Proposal for a directive of the european parliament and of the council on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast). Report 2016/0382(COD), European Commission, Brussels.
18. Kumar Yogesh, Jordan Ringenberg, Soma Shekara Depuru, Vijay K. Devabhaktuni, Jin Woo Lee, Efstratios Nikolaidis, Brett Andersen, Abdollah Afjeh. Wind energy:

- Trends and enabling technologies // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 53. P.209-224.
19. Hirtenstein A., Morison R. Subsidy-Free Wind Power Possible in \$ 2.7 Billion Dutch Auction. "<https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-12-14/subsidy-free-wind-power-possible-in-2-7-billion-dutch-auction>". [last accessed – 11/03/2018].
 20. Андреевна М. С., Методики оценки ветроэнергетических ресурсов в условиях ограниченности природно-климатической информации // Магистерская диссертация, СПб, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2016, 128 С.
 21. Zubiaga M., Energy transmission and grid integration of AC offshore wind farms. Ph.D. dissertation, Escuela Politecnica Superior de Mondragon. 2011.
 22. Schoenung S. M. Characteristics and technologies for long-vs. shortterm energy storage, United States Department of Energy. 2001.
 23. Zhou Z. Modeling and power control of a marine current turbine system with energy storage devices. PhD thesis, Université de Bretagne Occidentale. 2014.
 24. Komor P., Glassmire J. Electricity Storage and Renewables for Island Power; IRENA: Abu Dhabi, UAE, 2012
 25. Абдали Л. М., Аль-Руфай Ф. М., Якимович Б. А., Кувшинов В. В. Оптимизация аккумулирования энергии в гибридных системах ветроэнергетики и фотовольтаики // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2020. Т. 23. № 2. С. 100-108.
 26. Салиев М. А., Юсупова М. З., Каландаров Х. У. Мониторинг аккумулирования тепловой энергии наружных ограждающих конструкций зданий в летний период // Вестник ПИТТУ имени академика М.С. Осими. 2019. № 4(13). С. 51-59.
 27. Hu X. Zou C., Zhang C., Li Y. Technological developments in batteries: A survey of principal roles, types, and management needs // IEEE Power and Energy Magazine. 2017. vol. 15. no. 5. P. 20–31.

28. Абдали Л. М., Аль-Руфай Ф. М., Якимович Б. А., Кувшинов В. В. Анализ производительности гибридных фото-ветроэлектрических установок // Энергетические установки и технологии. 2019. Т. 5. № 2. С. 61-68.
29. Чебоксаров В. В., Кузнецов П. Н. Гибридные ветро-солнечные морские энергетические установки // Строительство и техногенная безопасность. 2020. № 18(70). С. 67-81.
30. Абдали Л. М. А., Кувшинов В. В. Генерация электрической энергии гибридной силовой установкой // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов: Сборник докладов IX Всероссийской научно-практической конференции, Томск, 24–26 апреля 2019 года. Томский политехнический университет. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет. 2019. С. 66-73.
31. Али К. А., Абдали Л. М., Мохаммед Х. Д. Анализ и моделирование автономной фотоэлектрической системы // Актуальные проблемы электроэнергетики: Сборник научно-технических статей конференции, Нижний Новгород, 17 декабря 2021 года. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. 2021. С. 309-317.
32. Сухенко А. К., Якимович Б. А., Кувшинов В. В. Методы тестирования наземных фотоэлектрических модулей // Энергетические установки и технологии. 2021. Т. 7. № 3. С. 56-63.
33. Мохаммед Х. Д., Абдали Л. М., Исса Х. А. Проектирование и сравнительное исследование максимальной мощности точки с использованием методов моделирования для фотоэлектрических систем // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность: Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции, Севастополь. 2020. С. 382-386.
34. Абдали Л. М., Исса Х. А., Али К. А., Кувшинов В.В., Бекиров Э.А. Анализ и моделирование автономной фотоэлектрической системы с использованием

среды MATLAB/Simulink// Строительство и техногенная безопасность. 2021. № 21(73). С. 97-105.

35. Мохаммед Х. Д., Абдали Л. М., Исса Х. А., Аль-Руфай Ф. М. Разработка обобщенной фотоэлектрической модели с использованием MATLAB // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов: Сборник докладов X Всероссийской научно-практической конференции, Томск, 22–24 апреля 2020 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет. 2020. С. 166-172.
36. Абдали Л. М., Аль-Малики М. Н. К., Али К. А., Якимович Б. А., Коровкин Н. В. Использование гибридных ветро-солнечных систем для энергоснабжения города Аль-Наджаф в Республике Ирак // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2022. Т. 25, № 3. С. 82-91.
37. Vairagi B. D., Tandon A., Dewra R. S. Performance Analysis of DFIG Based Standalone 2.2 kW Laboratory Prototype Wind Turbine Emulator. J. Sci. Approach. 2017. Vol. 1(1), P.16-21.
38. Mathew S. Wind Energy Fundamentals Resources Analysis and Economics, Springer. 2006. P.220-227.
39. Кузнецов П. Н., Котельников Д. Ю. Автоматизированный комплекс интеллектуального мониторинга ветровых электростанций / П. Н. Кузнецов, // Энергосбережение и водоподготовка. 2022. Vol.135. № 1.– P. 4-10.
40. Anoune K., Bouya M., Astito A., Abdellah A. B. Sizing methods and optimization techniques for PV-wind based hybrid renewable energy system: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 93. P.652-673.
41. Аль-Руфай Ф. М., Абдали Л. М., Кувшинов В. В., Якимович Б. А. Оценка потенциала ветроэнергетических ресурсов на юге Ирака // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2020. Т. 23. № 3. С. 105-113.

42. Дерюгина Г.В., Малинин Н.К., Пугачев Р.В., Шестопалова Т.А. Основные характеристики ветра. Ресурсы ветра и методы их расчета: учебное пособие // М.; Издательство МЭИ. 2012.
43. Дзензерский В.А., Тарасов С.В., Костюков И.Ю. Ветроустановки малой мощности // Проект «Наукова книга» / Издательство «Наукова думка» НАН Украины. 2011. С. 591.
44. Елистратов В.В. Современное состояние и тренды развития ВИЭ в мире // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2017. № 01–03, С. 84–100.
45. Тимченко Е. Ю. Моделирование системы оптимального частотного управления асинхронным двигателем // Молодые учёные России: сборник статей VII Всероссийской научно-практической конференции в 2 частях, Пенза, 07 июня 2021 года. – Пенза: Наука и Просвещение. 2021. – С. 48-50.
46. Serway R.A., Vuille C. // College Physics, 9th ed. Brooks, Cole. 2011.
47. Абдали Л. М., Аль-Руфай Ф. М., Исса Х. А., Якимович Б. А. Моделирование и управление системой ветроэнергетики, связанной с сетью с использованием синхронного генератора с постоянными магнитами (СГПМ) // Актуальные проблемы электроэнергетики: Сборник научно-технических статей конференции, Нижний Новгород, 17 декабря 2021 года. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. 2021. С. 299-308.
48. Hau E. Wind Turbines: Fundamentals // Technologies, Application, Economics, 2nd edition. Berlin, Germany: Springer. 2016.
49. Lopez H. E. M. Maximum power tracking control scheme for wind generator systems Doctoral dissertation, Texas A & M University. 2008.
50. Ulazia A., Sáenz J., Ibarra-Berastegi G., González-Rojí S. J., Carreno-Madinabeitia S. Global estimations of wind energy potential considering seasonal air density changes // Energy. 2019. vol.187. P.115938.

51. Blackwood M. Maximum efficiency of a wind turbine. Undergraduate Journal of Mathematical Modeling. 2016. One+ Two. Vol. 6. No.2. 2.
52. Мезаал Н. А. Математическое моделирование ветроэнергетической установки (ВЭУ) мощностью 1.5 МВт методами вычислительной гидродинамики (CFD) в ANSYS Докторская диссертация, Южно-Уральский государственный университет.2018.
53. Astolfi D. Wind Turbine Operation Curves Modelling Techniques. Electronics. 2021. 10. No.3. 269.
54. Usman H. M., Mukhopadhyay S., Rehman H. Permanent magnet DC motor parameters estimation via universal adaptive stabilization // Control Engineering Practice, 2019. Vol. 90. P.50-62.
55. Alejandro Rodríguez-Molina, Miguel G. Villarreal-Cervantes, Jaime Álvarez-Gallegos, Mario Aldape-Pérez. Bio-inspired adaptive control strategy for the highly efficient speed regulation of the DC motor under parametric uncertainty//Applied Soft Computing. 2019. Vol. 75. P. 29-45.
56. Reddy, Thomas B. Linden's handbook of batteries. New York: Mcgraw-hill, 2011. Vol. 4.
57. Buchmann I. Bu-107: Comparison table of secondary batteries. Battery University. http://batteryuniversity.com/learn/article/secondary_batteries (accessed 13 February, 2020).
58. <https://tractor-sale.ru/akkumulyator/reanimatsiya-litij-ionnyh-akkumulyatorov.html>
59. Кебеков Т. В., Гобозов М. Д. Литиевые вторичные химические источники тока, анализ и сравнение литий-ионных аккумуляторов и литий-полимерных аккумуляторов // Научное обозрение: сборник статей Международного научно-исследовательского конкурса, Пенза, 05 мая 2021 года. – Пенза: Общество с ограниченной ответственностью "Наука и Просвещение. 2021. С. 80-83.

60. Hariharan K. S., Tagade P., Ramachandran S. *Mathematical Modeling of Lithium Batteries: From Electrochemical Models to State Estimator Algorithms* // Springer International Publishing. 2018.
61. Борисевич, А. В. Моделирование литий-ионных аккумуляторов для систем управления батареями // обзор текущего состояния. Современная техника и технологии. 2014. Vol. 5. С. 10-10.
62. Боченин В.А., Зайченко Т.Н. Исследование и разработка модели Li-Ion аккумулятора // Научная сессия ТУСУР–2012: Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 16 –18 мая 2012 г. Томск: В-Спектр. 2012. Том 2. С. 174-177.
63. Chen M., Rincon-Mora G.A. Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I–V Performance // *IEEE Trans. Energy Conversion*. 2006. vol. 21, no. 2, P. 504-511.
64. Li X., Yang W., Wang H., Chang X., Dang R., Wang, D. Optimization of Li-ion Battery Charge and Discharge Model Based on Genetic Algorithm // *International Conference on Genetic and Evolutionary Computing*. 2021. P. 36-46.
65. Surya S. *Mathematical Modeling of DC-DC Converters and Li Ion Battery Using MATLAB/Simulink* // *In Electric Vehicles and the Future of Energy Efficient Transportation*. 2021. P. 104-143.
66. Galushkin N. E., Yazvinskaya N. N., Galushkin D. N., Galushkina, I. A. Statistical models of alkaline batteries discharge // *International journal of electrochemical science*. 2015. Vol. 10. No.7. P.5530-5535.
67. Arianto S., Yunaningsih R. Y., Astuti E. T., Hafiz, S. Development of single cell lithium-ion battery model using Scilab/Xcos // *AIP Conference Proceedings*. 2016. Vol. 1711. No. 1. p. 060007.
68. Tremblay O., Dessaint L. A. Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications // *World Electric Vehicle Journal*. 2009. vol. 3. pp. 289–298.

69. Li S., Ke B. Study of battery modeling using mathematical and circuit oriented approaches // IEEE Power and Energy Society General Meeting. 2011. P. 1–8.
70. Белименко С. С., Ищенко В. А. Разработка критериев эффективности заряда и разряда твердотельного теплового аккумулятора. Наука и прогресс транспорта // Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта. 2014. Vol. 5. No.53. С.7-16.
71. Абд А. Л. М., Исса Х. А. Hybrid power generation using solar and wind energy // Молодой ученый. 2018. Vol. 7. No. 193. P.19-26.
72. Abdali A. L. M., Yakimovich B. A., Kuvshinov V. V. Hybrid power generation by using solar and wind energy // energy. 2018. Vol.2. No.3. P.26-31.
73. Ансари О. М., Мохммед Х. А., Абд А. Л. М. Design and Simulation a hybrid generation system through wind turbine and solar energy with a heat engine // Молодой ученый. 2018. Vol.38. P.11-24.
74. Maalawi KY. Modeling, Simulation and Optimization of Wind Farms and Hybrid Systems // London: IntechOpen. 2020. Vol 262.
75. Аль-Руфайи Ф. М., Кувшинов В. В., Абдали Л. М., Мохаммед Х. Д. Разработка комбинированных автономных систем электроснабжения малой мощности с солнечной энергией для производства электроэнергии в сельских районах // Актуальные проблемы электроэнергетики : Сборник научно-технических статей конференции, Нижний Новгород, 17 декабря 2021 года. – Нижний Новгород: Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева. 2021. С. 318-325.
76. Абдали Л. М., Аль-Малики М. Н. К., Аль Баирмани А. Г. Анализ методов управления производительностью преобразователей постоянного тока солнечных элементов и выбор оптимального метода // Интеллектуальные системы в производстве. 2023. Т. 21, № 1. С. 125-137.
77. Абдали Л. М., Кувшинов В. В., Бекиров Э. А., Аль-Руфайи Ф. М. Моделирование параметров управления интегрированной системой солнечной генерации и

- накопления энергии // Строительство и техногенная безопасность. 2020. № Vol. 18. №.70. С. 133-142.
78. Исса Х. А., Абдали Л. М., Али К. А. Упрощенный и комплексный подход характеристике промышленных фотоэлектрических систем // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов: Сборник докладов I Международной научно-практической конференции. В 2 томах, Томск, 27–29 апреля 2021 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет. 2021. С. 137-145.
79. Бекиров Э.А., Воскресенская С.Н., Химич А.П. Расчет системы автономного энергоснабжения с использованием фотоэлектрических преобразователей // Учебное пособие для дипломного проектирования. 2012. С. 122.
80. Cirak Bekir. Modelling and Simulation of Photovoltaic Systems Using MATLAB/Simulink //WSEAS Transactions on Power Systems. 2023. Vol. 18. P. 49-56.
81. Fang B., Xing Z., Sun D., Li Z., Zhou, W. Hollow semiconductor photocatalysts for solar energy conversion //Advanced Powder Materials. 2022. Vol. 1. No. 2. P.100021.
82. Кувшинов В. В., Какушина Е. Г., Тиман Д. И. Использование энергосберегающих технологий для системы электрического освещения города на основе фотоэлектрических преобразователей // Энергетические установки и технологии, 2022. Т. 8. № 1. С. 78-83.
83. Kuvshinov V. V., Abd Ali L. M., Kakushina E. G., Krit B. L., Morozova N. V., Kuvshinova V. V. Studies of the PV Array Characteristics with Changing Array Surface Irradiance // Applied Solar Energy. 2019. Vol. 55. No 4. P. 223-228.
84. AlZubaidi Asaad AH, Laith Abdul Khaliq, Hassan Salman Hamad, Waleed Khalid Al-Azzawi, Mohanad Sameer Jabbar, and Thaer Abdulwahhab Shihab. "MPPT implementation and simulation using developed P&O algorithm for photovoltaic system concerning efficiency." Bulletin of Electrical Engineering and Informatics 11.2022. no. 5. P.2460-2470.

85. Issa H. A., Mohammed H. J., Abdali L. M. Mathematical Modeling and Controller for PV System by Using MPPT Algorithm // Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova. 2021. Vol. 24. No 1. P. 96-101.
86. Guryev V. V., Yakimovich B. A., Abd Ali L. M., Al Barmani A. G. Improvement of Methods for Predicting the Generation Capacity of Solar Power Plants: The Case of the Power Systems in the Republic of Crimea and City of Sevastopol // Applied Solar Energy. 2019. Vol. 55. No 4. P. 242-246.
87. Abd Alhussain, H. M., Yasin, N. Modeling and simulation of solar PV module for comparison of two MPPT algorithms (P&O & INC) in MATLAB/Simulink // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. 2020. Vol. 18. No.2. pp.666-677.
88. Vologdin S. V., Yakimovich B. A., Kuvshinov V. V. Analysis of Various Energy Supply Scenarios of Crimea with Allowance for Operating Modes of Solar Power Planta // Applied Solar Energy. – 2019. – Vol. 55. – No 4. – P. 229-234.
89. Singh Chawda G., Prakash Mahela O., Gupta N., Khosravy M., Senjyu T. Incremental conductance based particle swarm optimization algorithm for global maximum power tracking of solar-pv under nonuniform operating conditions // Applied Sciences. 2020. Vol.10. No.13. P. 4575.
90. Cheboxarov V. V., Yakimovich B. A., Abd Ali L. M., Al-Rufee F. M. An Offshore Wind-Power-Based Water Desalination Complex as a Response to an Emergency in Water Supply to Northern Crimea // Applied Solar Energy. 2019. Vol. 55. No 4. P. 260-264.
91. Абдали Л. М., Аль-Руфай Ф. М., Исса Х. А., Мохаммед Х. Д. Моделирование и контроль энергии ветра // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов: Сборник докладов X Всероссийской научно-практической конференции, Томск, 22–24 апреля 2020 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет. 2020. С. 14-19.

92. Кувшинов В. В., Какушина Е. Г., Власов Н. А. Перспективы развития малой ветроэнергетики в Российской Федерации // Энергетические установки и технологии. 2021. Т. 7. № 3. С. 64-69.
93. Аль-Руфайи Ф. М., Абдали Л. М., Исса Х. А., Мохаммед Х. Д. Использование энергии ветра в сельских районах // Научная инициатива иностранных студентов и аспирантов российских вузов: Сборник докладов X Всероссийской научно-практической конференции, Томск, 22–24 апреля 2020 года. – Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет. 2020. С. 38-43.
94. Pasquato L., Bonotto N., Tosato P., Brunelli D. An optimized wind energy harvester for remote pollution monitoring. // IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems (EESMS).2017. P.1-6.
95. Стольнова А. М., Закожурников С. С. Потенциал использования энергии ветра в мелиорации земель Волгоградской области // Теплоэнергетика: Пятнадцатая всероссийская (седьмая международная) научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых: материалы конференции. В 6-ти томах, Иваново, 07–10 апреля 2020 года. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина. 2020. С. 52.
96. Ибрагим А. А. И. Управление мощностью ветроэлектрической установки при возмущениях сети: специальность 24.50.00: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ибрагим Ахмед Амер Ибрагим. 2022. 205 с.
97. Зайдуллин Р. Р., Никитина К. В., Лелицкий М. В., Пастухов В. В. Адыгейская ветроэлектростанция: изыскания, проектирование, авторский надзор // Гидротехническое строительство. 2020. № 8. С. 58-64.
98. Кочетков М. В. Ветроэлектростанция для Норильского промышленного района - за и против // Культура. Наука. Производство. 2020. № 5. С. 85-89.

99. Zebraoui O., Bouzi M. Comparative study of different MPPT methods for wind energy conversion system // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018. Vol. 161. No. 1. P. 012023.
100. Mousa H. H., Youssef A. R., Mohamed E. E. Adaptive P&O MPPT algorithm-based wind generation system using realistic wind fluctuations // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. 2019. Vol. 112. P.294-308.
101. Абдали Л. М., Аль-Руфайи Ф. М., Якимович Б. А., Кувшинов В. В. Интеллектуальная система управления, используемая при работе ветроэлектрических установок // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2021. Т. 24. № 1. С. 102-112.
102. Сейтбатталов Ш. Б., Есенбаев С. Х. Системы контроля турбины и генератора ТЭЦ // Автоматика. Информатика. 2020. № 1. С. 134-139.
103. Abd Ali L. M., Al-Rufaei F. M., Kuvshinov V. V., Krit B. L., Al-Antaki A. M., Morozova N. V. Study of hybrid wind-solar systems for the Iraq energy complex. Applied Solar Energy. 2020. Vol. 56. No.4. P.284-290.
104. Dascalu Andrei, Suleiman Sharkh, Andrew Cruden, Peter Stevenson. "Performance of a hybrid battery energy storage system // Energy Reports. 2022, Vol.8. P.1-7.
105. Kuvshinov V. V., Kakushina E. G., Abd Ali L. M., Kuvshinova V. V. Storage System for Solar Plants // Applied Solar Energy. 2019. Vol. 55. No 3. P. 153-158.
106. Хандорин М. М. Оценка остаточной ёмкости литий-ионного аккумулятора в режиме реального времени/ М. М. Хандорин, В. Г. Букреев // Электрохимическая энергетика. 2014. Vol.14. No. 2. С.78-84.
107. Возмилов А. Г., Панишев С. А., Лисов А. А. Исследование и математическое моделирование литий-ионного аккумулятора // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2022. Том 22. № 2. С. 30-36.

108. Ukoba Kingsley Ogheneovo, Freddie Liswaniso Inambao. Modeling of fabricated NiO/TiO₂ PN heterojunction solar cells // International Journal of Applied Engineering Research. 2018. Vol. 13. No. 11. P. 9701-9705.
109. Абдали Л. М., Аль-Малики М. Н. К., Исса Х. А. Использование метода отслеживания точки максимальной мощности для увеличения эффективности работы фотоэлектрических установок // Интеллектуальные системы в производстве. 2022. Т. 20. № 4. С. 106-116.
110. Абдали Л. М., Исса Х. А. И., Аль-Малики М. Н. К., Якимович Б. А., Кувшинов В. В. Анализ различных методов отслеживания точки максимальной мощности при работе солнечных фотоэлектрических систем // Интеллектуальные системы в производстве. 2022. Т. 20, № 3. С. 104-113.
111. [Электронный ресурс] // URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Jul/IRENA_Power_Generation_Costs_2021.pdf?rev=34c22a4b244d434da0accde7de7c73d8 (дата обращения 11.06.2023).

Акты внедрения результатов работы

Утверждаю

проректор по образовательной
деятельности СевГУ



Душко В. Р

22 ноябрь 2022 г.

Акт

О применении результатов диссертационной работы Абдали Лаит Мохаммед Абдали «Разработка системы управления и алгоритма повышения эффективности работы гибридных ветро-солнечных электростанций»

Материалы диссертационной работы Абдали Л. М. были использованы в учебном процессе кафедры «Возобновляемые источники энергии электрические системы и сети» в Институте ядерной энергии и промышленности Севастопольского государственного университета.

Полученные материалы были применены при разработке курса лекций, лабораторных работ и практических занятий на кафедре «Возобновляемые источники энергии электрические системы и сети» по дисциплинам «Применение солнечной энергии», «Альтернативные и возобновляемые источники энергии», «Альтернативная энергетика» и «Ветроэнергетика» в рамках учебного процесса Севастопольского государственного университета.

Практический интерес представляют разработки гибридных ветро-солнечных установок, проведенные на полигоне лаборатории «Возобновляемой энергетике» кафедры ВИЭСС, находящейся на турбазе «Горизонт».

Заведующий кафедрой ВИЭСС д.т.н., профессор

Якимович Б.А.



НАУЧНО ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ ФИРМА

“ЭНЕРГОСПЕЦПРОЕКТ”

298500 Россия
Автономная Республика Крым
г.Алушта, ул.Судакская, 26-100

р/с № 40702810104330000016
ЗАО “ГЕНБАНК” г.Симферополь
ИНН/КПП 9101005812/910101001

тел:
+79788597558
06560 3 37 29

Исх.№ 26
от 09 декабря 2022г.

Акт

о применении результатов диссертационной работы Абдали Лаит Мохаммед Абдали
«Разработка системы управления и алгоритма повышения эффективности работы гибридных ветро-солнечных электростанций»

Результаты диссертационной работы Абдали Лаит Мохаммед были применены нашим предприятием при оснащении системами солнечного электроснабжения объектов санаторно-курортного комплекса Республики Крым.

В качестве объектов была использована фотоэлектрическая система с МРРТ – контроллером управления выходными характеристиками. В солнечной станции были использованы два фотоэлектрических модуля мощностью 240 W каждый. Конструктивно стандартный (контрольный) модуль представляет собой панель из последовательно соединённых фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) из монокристаллического кремния.

Исследования были проведены на полигоне лаборатории кафедры «Возобновляемые источники энергии электрические системы и сети» на турбазе Севастопольского государственного университета «Горизонт». Проведённые замеры в стандартных условиях тестирования (температура 25 °С, интенсивность освещения 1000 Вт*м²) показали увеличение выработки электроэнергии на 20 % предположительно – за счёт использования МРРТ – контроллера.

Таким образом, отмечено увеличение энергетической эффективности экспериментальной солнечной станции с МРРТ – контроллером, используемым для управления системой солнечной генерации электроэнергии в сравнении с установками без предложенных систем управления.

Директор НФО «ЭНЕРГОСПЕЦПРОЕКТ»



Ю.М.Звягинцев



«ЭНЕРГОСПЕЦСТРОЙ»

98500, Российская Федерация
Республика Крым
г. Алушта, ул. Пионерская, 17

р/с 40702810042590041095
в КФ РНКБ (ОАО) в г. Симферополь
БИК 044525585 ОКПО 32499708

тел.: 8 (06560) 2-18-29
+7(978) 741-23-03

Исх. № 26
от « 08 » декабря 2022г.

Акт

О применении результатов диссертационной работы Абдали Лаит Мохаммед Абдали «Разработка системы управления и алгоритма повышения эффективности работы гибридных ветро-солнечных электростанций»

Результаты диссертационной работы Абдали Л. М. были применены предприятием «Энергоспецстрой» при оснащении системами ветрового и солнечного электроснабжения объектов энергетического комплекса Республики Крым.

Практический интерес представляют разработки и исследования гибридных ветро-солнечных установок, проведенные в лабораториях кафедры «Возобновляемые источники энергии электрические системы и сети».

Полученные материалы были применены при разработке солнечной электростанции малой мощности. Расположенной в городе Алушта. В качестве объектов были использованы фотоэлектрические модули PS-250, мощностью 250 W. Конструктивно стандартный (контрольный) модуль представляет собой панель из последовательно соединённых 60 фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) из поликристаллического кремния.

Замеры были проведены в стандартных условиях тестирования (температура 25 °С, интенсивность освещения 1000 Вт*м²) и показали увеличение среднегодовой выработки электрической энергии при использовании комбинированной ветро-солнечной установки. Таким образом, отмечено увеличение энергетической эффективности экспериментальной ветро-солнечной электростанции в среднем на 10 % в сравнении с отдельной работой ветровой электроустановки и солнечных панелей.

Ген. директор ООО «ЭНЕРГОСПЕЦСТРОЙ»



А.М. Бабенко



العدد: 43
التاريخ: 2 / 12 / 2022

Акт

О применении результатов диссертационной работы Абдали Лаит Мохаммед Абдали «Разработка системы управления и алгоритма повышения эффективности работы гибридных ветро-солнечных электростанций»

Результаты диссертационной работы Абдали Лаит Мохаммед были применены нашим предприятием при оснащении системами ветрового и солнечного электроснабжения объектов энергетического комплекса в городе Наджаф Республики Ирака.

В качестве объектов была использована фотоэлектрическая система с MPPT – контроллером управления выходными характеристиками. В солнечной станции были использованы 12 фотоэлектрических модулей LDK 180D-24(s), мощностью по 180 W каждый. В дополнение к одному модулю использовалась ветровая турбина мощностью 1800 Вт. Также был предложен метод управления контроллером, использующий метод сравнения P&O и метод TSR, который учитывает коэффициент быстроходности и скорость вращения лопасти.

Измерения проводились при различных условиях (изменялись температура модулей и интенсивность солнечного излучения), в результате было показано увеличение среднегодовой выработки электрической энергии при использовании гибридных ветро-солнечных электростанций. Таким образом, отмечено увеличение энергетической эффективности экспериментальной ветро-солнечной электростанции в сравнении с отдельной работой ветровой электрической установки и солнечных панелей.

директор
«Баракат аль-Катиф для электромонтажных
работ»

Хоссам Абдель Халек
Вахаб



E.mail : hassamal817@gmail.com
Mobile : 07839541313

العراق - النجف - شارع المدينة

Act

On the application of the results of the dissertation work of Abdali Layth Mohammed Abdali "Development of a control system and an algorithm for improving the efficiency of hybrid wind-solar power plants"

The results of the dissertation work of Abdali Layth Mohammed were applied by our enterprise when equipping wind and solar power supply systems for energy complex facilities in the city of Najaf, Republic of Iraq.

As objects, a photovoltaic system with an MPPT, a controller for controlling output characteristics, was used. The solar station used 12 photovoltaic modules LDK 180D-24(s), with a power of 180 W each. In addition to one module 1800 W wind turbine was used. A controller control method has also been proposed using the P&O comparison method and the TSR method, which takes into account the speed factor and the blade rotation speed.

The measurements were carried out under various conditions (the temperature of the modules and the intensity of solar radiation changed), as a result, an increase in the average annual generation of electrical energy using hybrid wind-solar power plants was shown. Thus, an increase in the energy efficiency of the experimental wind-solar power plant was noted in comparison with the separate operation of the wind power plant and solar panels.

director

"Barakat Al-Qateef for electrical contracting"

Hossam Abdel Khalek Wahab



Таблица 1. Результаты средней выходной мощности для гибридной ветро-солнечной системы в марте с использованием повышение эффективности методов

время	Мощность (Вт)		
	Солнечные панели	Ветрогенератор	Гибридная установка
8:16	418.88	289.62	698.89
8:26	394.58	363.58	808.25
8:35	461.03	384.33	828.19
8:42	475.29	349.73	800.82
8:49	480.61	315.29	749.64
8:57	501.01	310.26	720.07
9:04	505.45	304.69	660.60
9:12	493.03	254.84	666.72
9:19	493.03	259.37	671.86
9:26	493.03	272.21	690.17
9:34	501.90	266.17	672.01
9:41	524.08	269.94	708.86
9:49	528.51	252.57	705.80
9:56	531.17	275.99	726.19
10:03	546.25	279.76	753.72
10:11	546.25	291.85	773.09
10:18	553.35	284.30	786.34
10:27	599.02	253.89	774.11
10:33	573.75	221.90	766.97
10:40	563.10	298.59	818.45
10:48	568.43	282.03	796.54
10:55	572.86	296.38	794.50

11:02	575.52	337.03	804.69
11:10	582.62	370.55	818.63
11:17	595.04	309.26	870.45
11:25	595.04	350.01	924.19
11:32	591.49	348.50	881.16
11:47	602.13	326.59	916.84
11:54	614.55	410.38	892.30
12:01	614.55	387.02	868.35
12:09	619.87	430.76	967.31
12:16	623.42	396.46	1,018.72
12:24	632.29	351.54	989.30
12:31	656.24	341.72	1,048.94
12:46	726.50	424.78	996.37
12:53	698.81	458.02	1,061.61
13:00	694.38	460.28	1,119.39
13:08	715.67	435.44	1,171.72
13:14	745.37	503.33	1,199.17
13:23	725.84	497.35	1,246.56
13:30	731.26	518.77	1,254.62
13:39	739.06	537.94	1,281.13

Таблица 2. Результаты средней выходной мощности для гибридного ветро-солнечная системы в Апреле с использованием повышение эффективности методов

Время	Мощность (Вт)		
	Солнечные панели	Ветрогенератор	Гибридная установка
8:35	839.29	228.81	1,058.14
8:42	825.31	208.73	1,052.20
8:50	828.35	229.75	1,051.02

8:57	868.22	106.60	1,075.62
9:04	894.29	104.45	1,126.60
9:19	889.69	109.16	1,042.13
9:34	854.42	343.53	1,143.89
9:49	854.42	209.77	1,097.34
9:56	843.68	296.96	1,150.81
10:04	900.49	163.91	1,144.37
10:18	829.85	213.59	1,077.75
10:25	817.61	256.27	1,072.28
10:33	828.35	364.34	1,125.11
10:40	825.28	319.90	1,179.89
10:55	816.08	193.98	1,045.80
11:02	822.21	212.96	1,050.34
11:17	862.09	276.13	1,097.76
11:24	862.09	226.24	1,144.93
11:46	817.61	200.17	1,086.66
11:53	843.68	274.23	1,141.76
12:01	871.29	361.18	1,186.10
12:08	883.56	336.70	1,234.82
12:15	882.02	358.65	1,230.98
12:23	874.35	328.26	1,233.79
12:30	880.49	247.53	1,248.58
12:37	886.62	279.24	1,235.42
12:45	901.96	221.42	1,188.99
12:52	897.36	319.29	1,165.33
13:07	931.09	392.04	1,165.48
13:14	934.16	303.47	1,337.54
13:21	946.43	297.33	1,336.35
13:36	998.57	304.39	1,332.47
13:50	1,041.51	445.51	1,369.91
14:05	1,062.98	540.95	1,563.00
14:27	1,070.64	418.28	1,477.25
14:36	1,081.38	465.17	1,514.42
14:43	1,139.74	497.89	1,602.69

Таблица 3. Результаты средней выходной мощности для гибридного ветро-солнечная системы в май с использованием повышение эффективности методов

время	Мощность (Вт)		
	Солнечные панели	Ветрогенератор	Гибридная установка
8:03	882.2	210.3	1,060.6
8:08	931.1	212.6	1,096.8
8:13	953.0	212.6	1,140.2
8:22	982.2	225.0	1,162.0
8:27	1,001.7	225.0	1,162.0
8:32	1,016.3	225.0	1,176.4
8:42	1,011.5	225.0	1,181.3
8:51	999.3	220.9	1,171.6
9:01	972.5	277.4	1,176.4
9:10	921.4	300.2	1,169.2
9:20	923.8	286.5	1,106.4
9:34	945.7	261.4	1,147.5
9:39	931.1	259.1	1,128.2
9:58	904.3	291.1	1,118.5
10:03	882.4	300.2	1,118.5
10:17	870.3	295.6	1,089.6
10:27	880.0	291.1	1,089.6
10:41	918.9	329.9	1,159.5
10:51	979.8	318.5	1,219.9
11:01	940.9	318.5	1,205.4
11:10	974.9	297.9	1,190.9
11:20	996.8	291.1	1,205.4
11:39	996.8	291.1	1,222.3
11:52	1,101.5	295.6	1,270.5
12:00	1,145.3	332.1	1,369.5
12:14	1,198.9	359.5	1,456.4
12:29	1,293.8	336.7	1,548.1
12:38	1,318.2	339.0	1,569.8
12:43	1,315.8	375.5	1,584.3
12:57	1,318.2	384.6	1,654.3
13:02	1,318.2	374.9	1,654.3
13:17	1,330.4	389.0	1,649.4
13:26	1,366.9	402.2	1,704.9
13:36	1,430.2	404.3	1,779.8
13:46	1,488.6	406.8	1,813.5
13:50	1,500.8	409.0	1,830.0
14:00	1,509.5	410.1	1,847.6