

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина»

На правах рукописи



Абдали Лаит Мохаммед Абдали

**РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И АЛГОРИТМА ПОВЫШЕНИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ГИБРИДНЫХ ВЕТРО-СОЛНЕЧНЫХ
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

2.4.5. Энергетические системы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Екатеринбург – 2024

Работа выполнена на кафедре «Возобновляемые источники энергии и электрические системы и сети» в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Севастопольский государственный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Якимович Борис Анатольевич

Официальные оппоненты: **Слепцов Владимир Владимирович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», заведующий кафедрой радиоэлектроники, телекоммуникаций и нанотехнологий»;

Юфев Леонид Юрьевич, доктор технических наук, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, главный научный сотрудник отдела энергообеспечения АПК;

Муртазаев Эннан Рустамович, кандидат технических наук, ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», г. Симферополь, доцент кафедры электроэнергетики и электротехники Физико-технического института;

Защита диссертации состоится «28» марта 2024 г. в 14:30 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 2.4.07.17 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?id=12&rid=5712>

Автореферат разослан «_____» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ташлыков Олег Леонидович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одной из технических проблем для фотоэлектрических и ветроэнергетических технологий является поиск точки максимальной мощности при работе модулей при изменении 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 Блаабьерг (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) и другими.

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 и другими.

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.

Для достижения этой цели были определены следующие **задачи**:

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 установкой.
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.

Научная новизна 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 до 12% за счет применения в системе управления модифицированных алгоритмов 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, 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 заключается в постановке задач исследования и реализации целей, обосновании научных положений, систематизации аспектов и условий, объясняющих потенциал и экономическую целесообразность использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) для электроснабжения удаленных потребителей, разработке моделей и алгоритмов, а также анализе и обобщении результатов практических и теоретических исследований гибридной ветро-солнечной системы с использованием программы Matlab, формулировании 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 технико-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; всероссийской научной конференции 12 молодежной школы с международным участием (24–25 ноября 2020) МГУ имени М.В. Ломоносова - г. Москва; научно-технической конференции «Актуальные проблемы электроэнергетики» 17 декабря 2021 года, НГТУ им. Р.Е. Алексеева - г. Нижний Новгород; 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 ВИЭСС СевГУ 2018-2023 годы.

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 42 печатных работах, которые в полной мере отражают материалы диссертационного исследования, 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.

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. Работа содержит 111 ссылок на литературные источники.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследования сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Приведены основные научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ компонентов гибридной энергосистемы, использованной в данной работе, на основе ветровой турбины и солнечных фотоэлектрических панелей, проведено обсуждение перспективных тенденций в области возобновляемых источников энергии.

Проведен анализ и математическое моделирование работы солнечного элемента фотоэлектрической установки. Выполнен обзор работ в области оценки мощности солнечной радиации. Установлено, что на производительность фотоэлектрических панелей также влияют другие факторы, такие как азимут, затенение и угол наклона фотоэлектрических панелей.

В разделе также обсуждаются ветровые турбины их динамические характеристики, анализируется электрическая схема, структурная модель и факторы, влияющие на их работу, такие как скорость вращения и угол установки лопастей. В этой главе также проанализированы типы аккумуляторов. Отмечено, что литий-ионные аккумуляторы являются наиболее эффективными аккумуляторами для

использования в предлагаемой системе, благодаря их высокой долговечности и надежности.

Во второй главе описано математическое моделирование компонентов гибридной ветро-солнечной энергетической системы, показаны результаты моделирования, оптимизации и контроля их параметров при использовании модифицированных алгоритмов.

В этой главе описывается динамическая имитационная модель компонентов фотоэлектрической установки, ветровой турбины и литий-ионной батареи. Моделирование и симуляция выполнены с использованием программных пакетов Matlab /Simulink и HOMER Pro x64, имитационная модель была проверена двумя способами. Первый заключается в выборе наиболее эффективного технического метода при управлении точкой максимальной мощности (ТММ) для панелей Delta BST 260-24P, путем сравнения трех методов, а второй - в проведении выборочных экспериментов. Показано, что традиционный метод инкрементной проводимости (ИП) фотоэлектрического модуля более эффективен по сравнению, чем методы «возмущения и наблюдения» (perturbation and observation (P&O)) и «восхождения к вершине» (Hill Climbing (HC)) для различных условий, эффективность при котором достигает 94% от мощности солнечных панелей. При использовании метода P&O эффективность достигает 92%, а при методе HC достигает 90%. Соответственно было обнаружено, что как смоделированные, так и измеренные результаты выходной мощности фотоэлектрического модуля хорошо совпадают. Стандартное отклонение составляет 0,4 Вт.

Основными факторами, от которых зависит алгоритм ИП, являются наклон кривой P-V (мощностной характеристики), dI и dV — изменения тока и напряжения, которые напрямую влияют на сопротивление нагрузки при изменении солнечного излучения. Ток фотоэлектрического модуля увеличивается, а напряжение уменьшается при традиционном методе с дополнительной проводимостью. С другой

стороны, когда сопротивление нагрузки увеличивается, ток падает, а напряжение возрастает. Напротив, при использовании модифицированного алгоритма ИП можно наблюдать увеличение как напряжения, так и тока при увеличении солнечного излучения. В результате можно выявить рост солнечной энергии, определив, достигнута ли она ТММ и увеличились ли напряжение и ток. Чтобы убедиться, что метод ТММ достигает цели, принимается допустимая ошибка (уравнение 1).

$$\left| \frac{dI}{dV} + \frac{I}{V} \right| < 0.065 \quad (1)$$

где V_{oc} – напряжение холостого хода солнечной фотоэлектрической панели.

Основной принцип реализации улучшенного алгоритма ИП, который позволяет с высокой скоростью и надежностью находить ТММ, заключается в разделении кривой P-V на три основные области (уравнение 2):

$$V_{ТММ} = 65\% V_{oc} - 85\% V_{oc} \quad (2)$$

Часть А, часть В и, наконец, часть С, следующим образом: от 0 до 65% V_{oc} для области А и от 65% V_{oc} до 85% V_{oc} для области В, тогда как область С составляет от 85% до V_{oc} , как показано на рисунке 1. Область В чаще всего включает в себя пространство ТММ. Основная цель процесса разделения — сократить пространство, затрат и время на поиск ТММ.

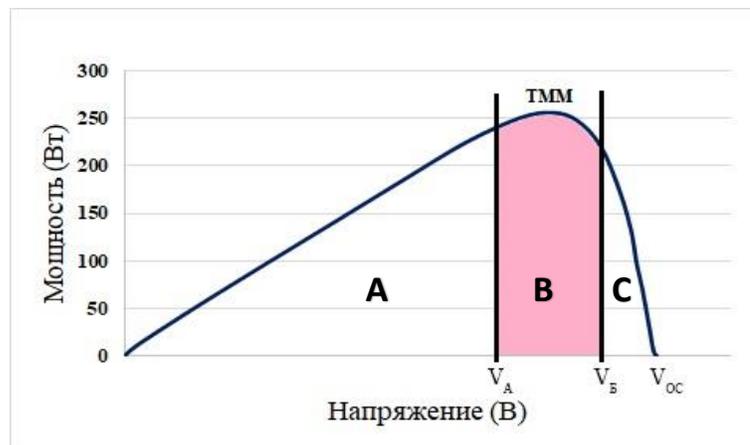


Рисунок 1 – Разделение областей напряжения на кривой P-V.

Известный модифицированный алгоритм инкрементной проводимости (рисунок 2) учитывает изменение параметров при увеличении уровня солнечного излучения.

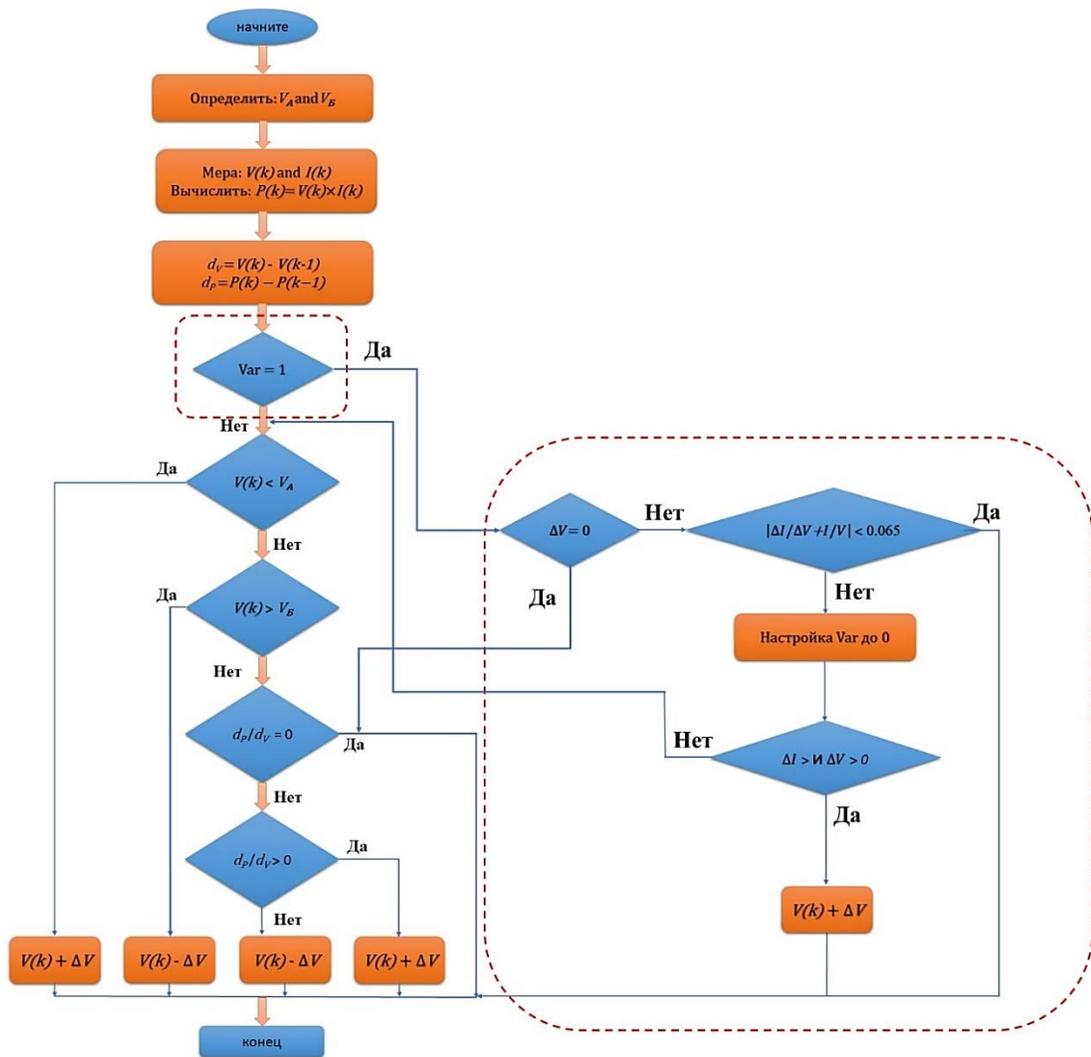


Рисунок 2 – Модифицированный алгоритм инкрементного проводимости.

Чтобы улучшить экономичность и эффективность фотоэлектрических систем, предложен улучшенный алгоритм инкрементной проводимости для системы управления ТММ. Это не только оптимизирует энергосистему, но также повышает эффективность, скорость отклика и точность отслеживания работы фотоэлектрических панелей, обеспечивая тем самым её стабильную работу. На

рисунках 3-5 показаны результаты моделирования предложенного и традиционного алгоритма ИП в условиях различной освещенности и различной температуры для определения ТММ, а также экспериментальные результаты.

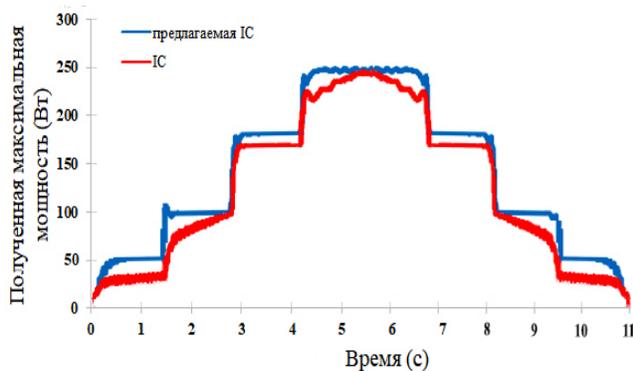


Рисунок 3 – Результаты моделирования предложенного и традиционного алгоритма ИП в условиях различной освещенности для определения ТММ

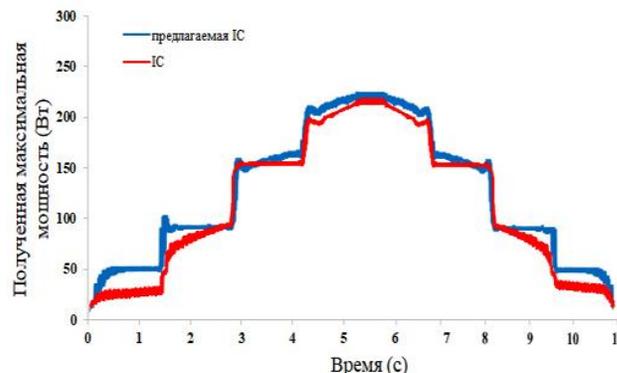


Рисунок 4 – Результаты моделирования предложенного и традиционного алгоритма ИП в условиях различных освещенностей и температур для определения ТММ

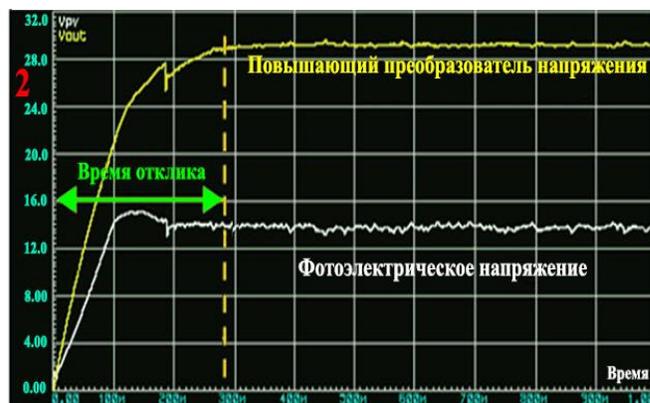


Рисунок 5 – Сравнительные экспериментальные результаты напряжений фотоэлектрического модуля и повышающего преобразователя для: 1 - традиционного алгоритма, 2-модифицированного алгоритма.

Программа Matlab/Simulink выполняется в условиях быстро меняющихся уровнях солнечной радиации, и сравнивает 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 энергосистему,

но также повышает её эффективность, скорость отклика и систему отслеживания генерации мощности фотоэлектрических панелей.

Для ветровой турбины конечные результаты моделирования показывают, что метод управления эффективно поддерживает выходную мощность генератора до его номинального уровня при высоких скоростях ветра. Был предложен метод, использующий сравнение P&O-метода с TSR-методом (изменение коэффициента быстроходности) при определении ТММ при быстром изменении скоростей ветра. В результате был получен новый логарифмический механизм управления ветровой турбиной который обеспечивает её стабильность в любых условиях. Было проведено моделирование с использованием среды Matlab для ветровой турбины с целью подтверждения достоверности предложенного метода ТММ. Рабочие характеристики контроллера с кривыми C_p (коэффициент мощности) представлены на рисунке 6.

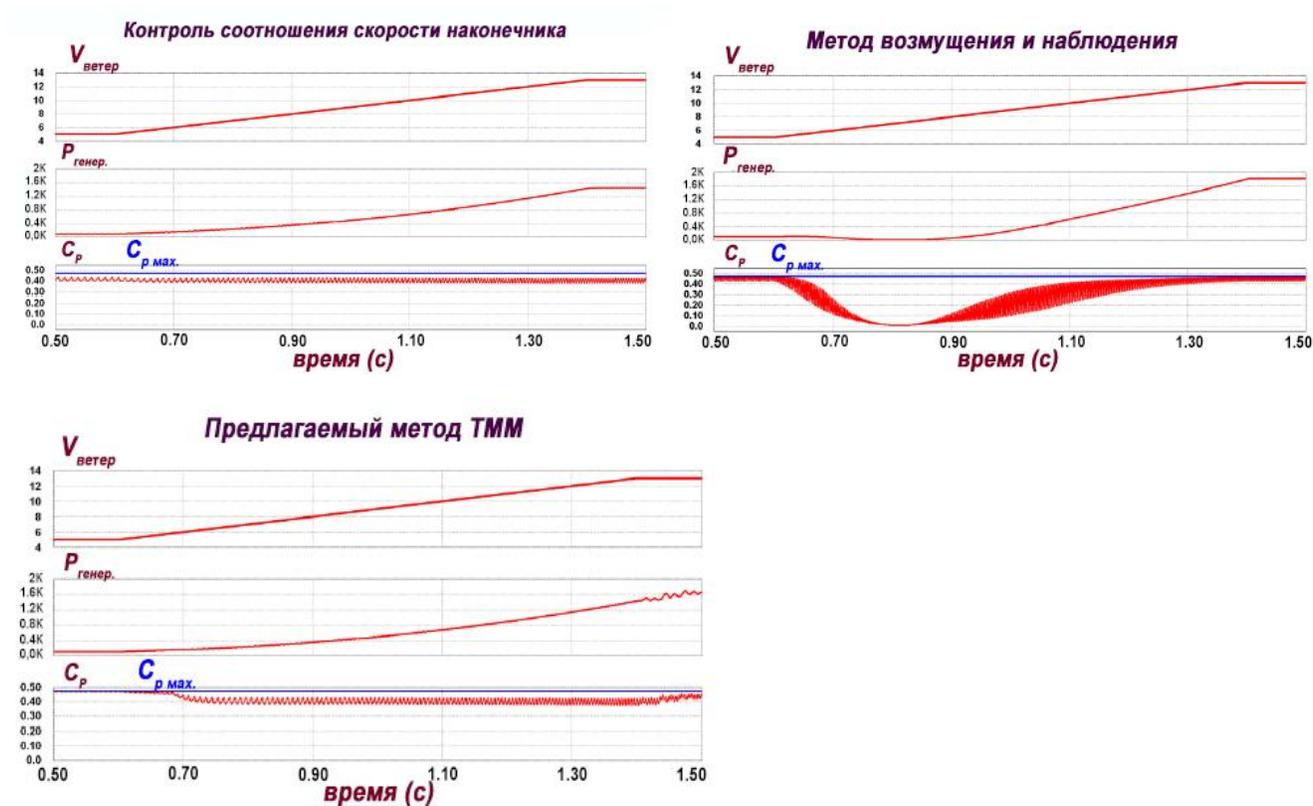


Рисунок 6 – Сравнительные характеристики производительности, полученные методом ТММ.

Для аккумуляторной батареи были проведены исследования динамического изменения параметров (зарядки и разрядки) литий-ионной батареи, с учетом состояния заряда аккумулятора. Показано, что, когда состояние заряда аккумулятора находится в пределах 20–100 %, ошибка между смоделированным напряжением и фактическим напряжением не превышает 6 %.

В третьей главе. описываются исследования установок на основе ВИЭ на полигоне высокотехнологичных энергетических систем, расположенном на территории Севастопольского государственного университета. Исследования представлены экспериментами, в которых использовалась ветровая электростанция с вертикальной осью вращения, мощностью 1,8 кВт, работающая в комбинации с 8 фотоэлектрическими модулями, мощностью по 260 Вт каждый и системой аккумулирования энергии. Также измерялись скорости ветрового потока и поступающее солнечное излучение на поверхность Земли.

На рисунке 7 показаны возможности генерирования энергии солнечными панелями и ветротурбинами в разные месяцы года. В результате было получено, что общая годовая выработка электроэнергии от гибридной ветро-солнечной 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 ветрового потока.

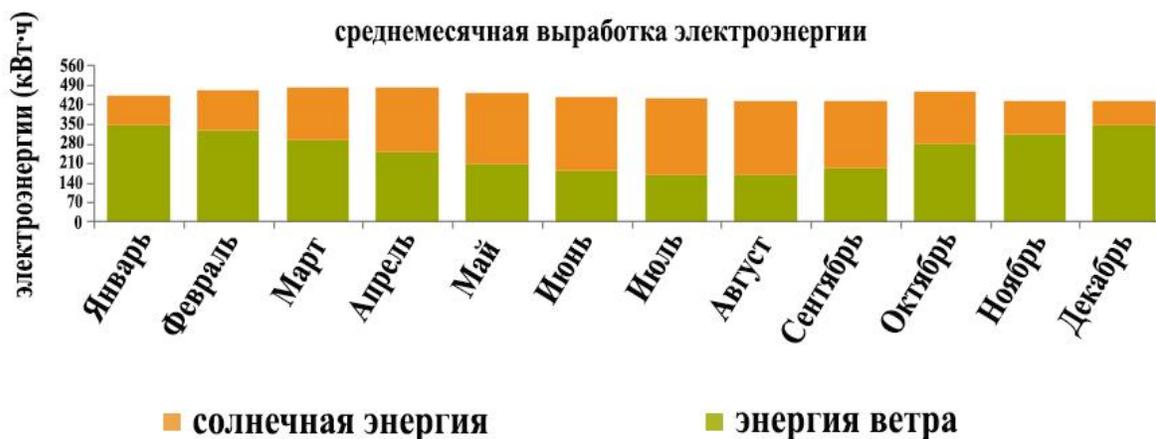


Рисунок 7 – Среднемесячное производство электроэнергии гибридной ветро-фотоэлектрической системой.

Из полученных экспериментальных результатов исследования гибридной ветро-солнечной установки на полигоне Севастопольского государственного университета видно, что эффективность работы системы значительно возрастает при комбинированной выработке электроэнергии ветроэлектрической установкой и фотоэлектрическими панелями. Это особенно актуально в районе территории Севастополя за счет уникального расположения полигона на открытой местности на склоне побережья Черного моря с высокой долей солнечной радиации и большой скоростью ветра.

Предлагаемая гибридная ветро-солнечная установка проиллюстрирована на схеме (рисунок 8). Её модель была проверена и смоделирована с помощью Matlab/Simulink для определения рабочих характеристик используемых возобновляемых источников энергии.

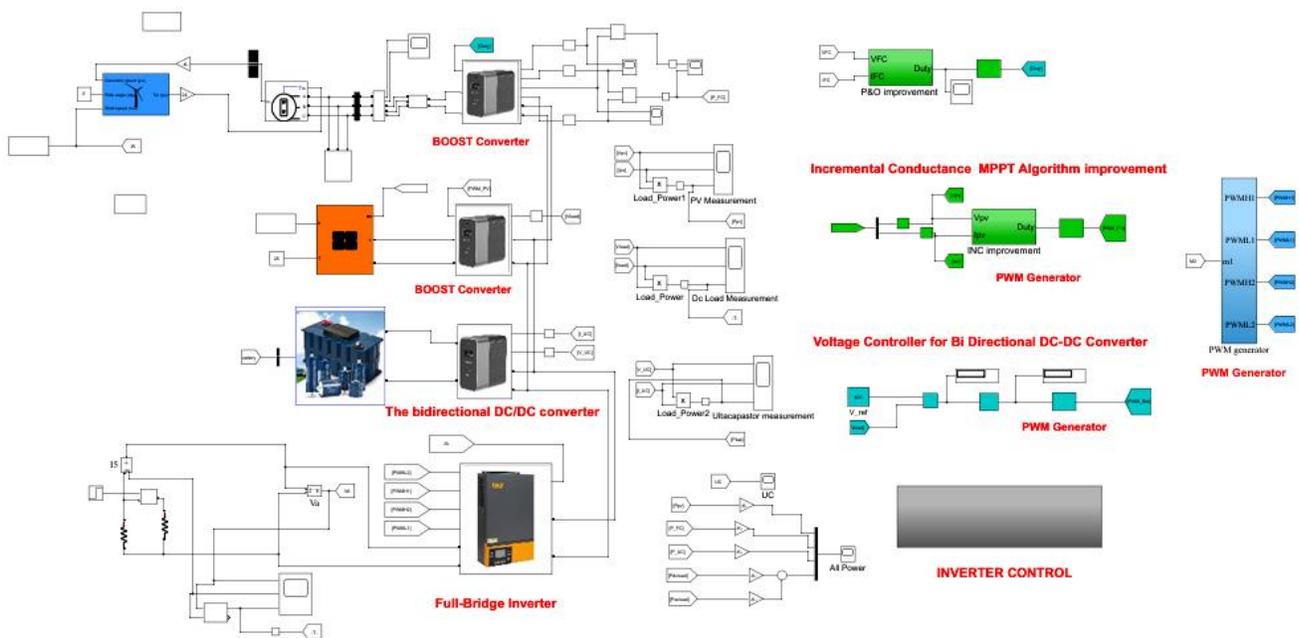


Рисунок 8 – Структура гибридной ветро-солнечной установки.

На рисунке 9(а) показано изменение выходной мощности гибридной ветро-солнечной системы с аккумуляторными батареями при использовании традиционного метода управления. Очевидно, что использование предложенного метода управления точкой максимальной мощности, как показано на рисунке 9(б),

может обеспечить адаптивное управление стабильным состоянием заряда батареи путем сглаживания процесса управления мощностью гибридной фотоэлектрической системы. При этом стабильность выходной мощности гибридной фото-ветроэлектрической системы также будет сохранена. В результате, предлагаемая стратегия управления может быть эффективной и более надежной.

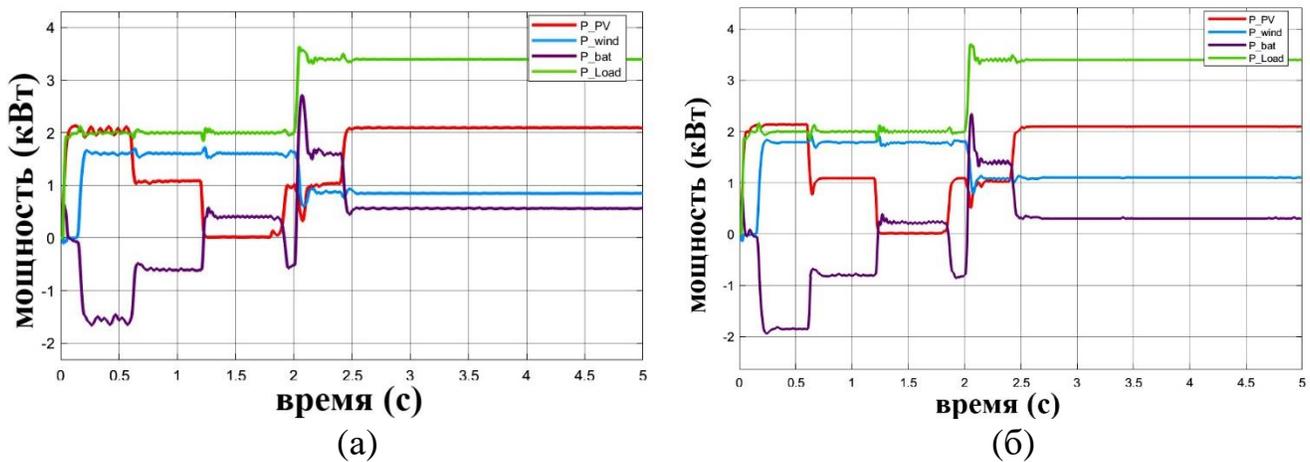


Рисунок 9 – Выходная мощность гибридной ветро-солнечной установки с использованием (а) традиционных (б) модифицированных алгоритмов.

В четвертой главе проведен анализ экспериментальных исследований гибридной энергоустановки, расположенной в городе Аль-Наджаф в Республике Ирак, а также её компонентов, на основе ветровой турбины и солнечных фотоэлектрических панелей.

Исследование, представленное в этой главе направлено на экспериментальное изучение производительности гибридной системы, которая использует как солнечную, так и ветровую энергию в качестве возобновляемых источников энергии с дополнительной аккумулирующей батареей. Было доказано преимущество максимизации выходной мощности и сохранения энергии в источнике питания постоянного тока. Выходная мощность измерялась в течение нескольких дней в разные месяцы (определяли выходное напряжение и выходной ток), как показано на рисунках 10 и 11.

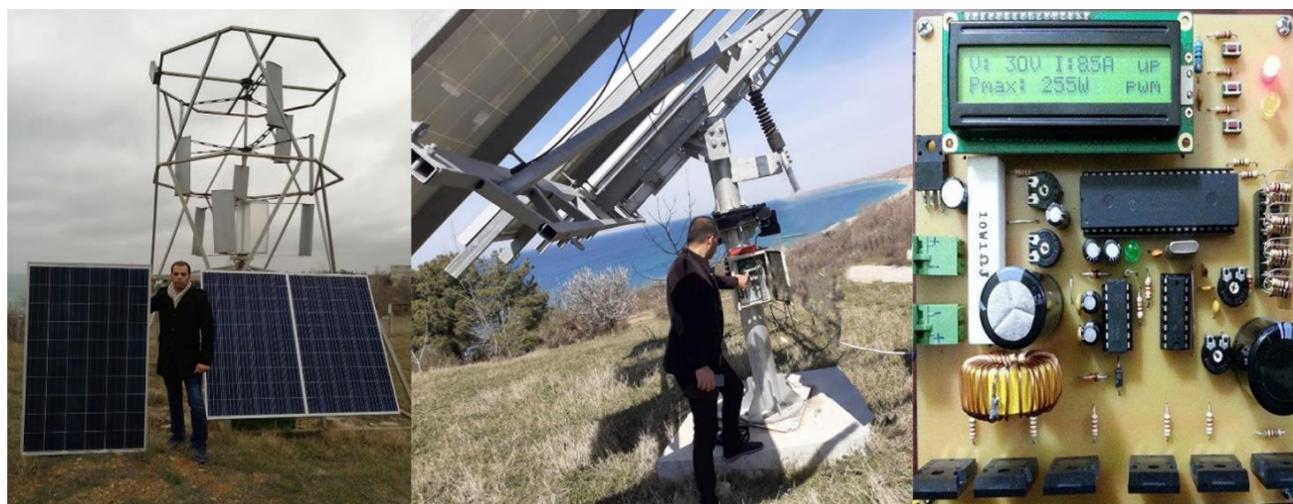


Рисунок 10 – Измерение выходной мощности для гибридных систем.

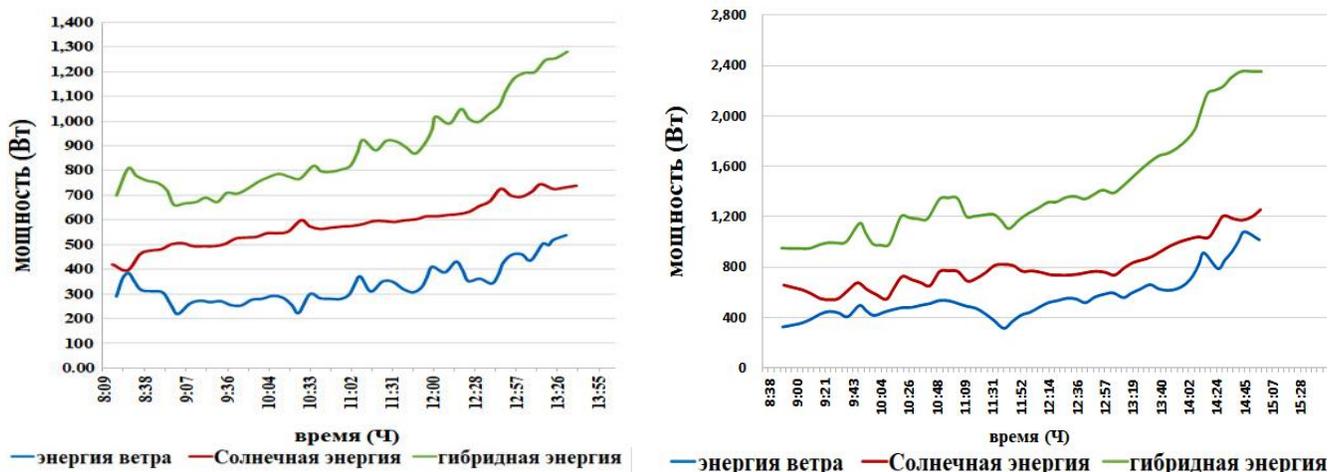


Рисунок 11 – Мощность, вырабатываемая гибридной системой в разные часы в марте и в августе с использованием модифицированных алгоритмов.

Данные, которые получили в результате имитационного моделирования, и результаты эксперимента, полученные в течение нескольких месяцев при различных погодных условиях представлены для гибридной системы с использованием ветровой турбины, мощностью 1800 Вт, и 12 солнечными панелями (LDK 180D-24(s)). Эти эксперименты показали, что выходная мощность в целом увеличилась в гибридных системах с использованием предложенного алгоритма ИП на 12%. При этом солнечная панель дает более высокую мощность, чем при использовании ветровой турбины. Кроме того, выходная мощность является более стабильной в

гибридной системе по сравнению с отдельной генерацией ветровыми и солнечными установками. Рисунок 12 показывает сравнение результатов средней выходной энергии для гибридной ветро-солнечной системы с использованием и без использования предлагаемых алгоритмов.

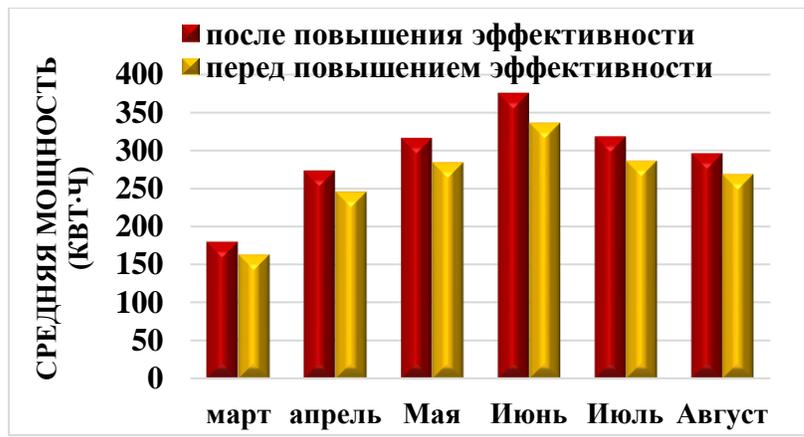


Рисунок 12 – Сравнительные результаты средней выходной энергии для гибридной ветро-солнечной системы с использованием и без использования модифицированных алгоритмов.

Технико-экономические исследования рассматривались посредством анализа приведенной стоимости, после чего составлялась диаграмма, описывающая изменение стоимости капитала за 25 лет, результаты показаны на рисунке 13(а). На рисунке 13(б) можно увидеть разницу в стоимости при использовании традиционной и модифицированной системы.

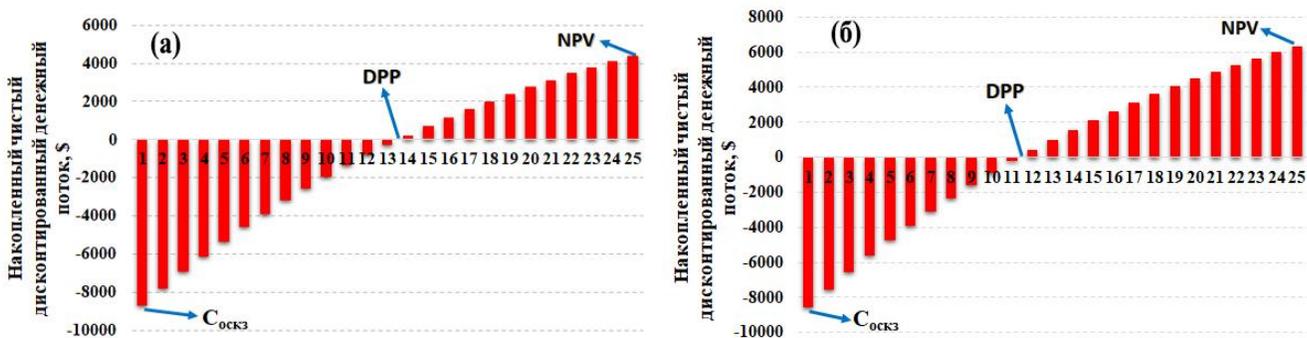


Рисунок 13 – Технико-экономические результаты для гибридной ветро-солнечной установки с использованием (а) традиционных (б) модифицированных алгоритмов.

Стоимость капитала при ожидаемом сроке работы предприятия 25 лет составляет 8709,52 долларов США, с расчетной процентной ставкой 5%. При тех же условиях период окупаемости для обычной гибридной ветро-солнечной системы составляет 13,5 лет, а для модифицированной системы — 11,5 лет. Если установка будет построена по традиционной модели, ожидается, что она будет вырабатывать примерно 6350 кВт·ч энергии в год (нормированная стоимость энергии (LCOE) оценивается в 0,083 \$ / кВт·ч), в то же время в модифицированной модели выработка будет составлять 7112 кВт·ч энергии в год (LCOE составляет около 0,075 \$ / кВт·ч).

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 его уровня, при этом улучшается экономичность и эффективность работы фотоэлектрической системы. Происходит не только оптимизация работы системы, но также повышение энергетических характеристик, скорости отклика и эффективности отслеживания работы. Алгоритм позволяет принимать правильное решение при внезапном изменении потока солнечной радиации, потери энергии сводятся к минимуму, при этом выработка мощности фотоэлектрическими панелям составляет до 98,3% 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. Предложенный модифицированный алгоритм для отслеживания точки максимальной мощности для ветроэнергетических систем включает в себя как

гистерезисное управление, так и управление отношениями линейной скорости вращения конца лопасти к ветровому потоку (коэффициентом быстроходности). Независимо от изменений скорости ветра предложенный механизм управления обладает улучшенными динамическими свойствами на мощностной характеристике. Предлагаемый метод обеспечивает повышение производительности и стабилизирует скорость вращения ротора ветротурбины при увеличении скорости ветрового потока выше номинального, кроме того, позволяет увеличить выработку электроэнергии. Использование предлагаемого метода показывает, что КПД в точке максимальной мощности повышается примерно на 8 % по сравнению с типовым обычным TSR-методом. Поскольку ошибка измерения мощности 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 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, позволяют использовать гибридные энергетические системы.

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 более стабильной.

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

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования

Проведенные исследования позволят в будущем более эффективно выполнять оценку состояния ветровых и солнечных ресурсов в Ираке, за счет внедрения искусственного интеллекта, а также использовать другие источники энергии (например, отопление с использованием накопителей тепла, с точки зрения получения преимуществ при достижении высоких температур летом), эти технологии будут работать более эффективно при комбинированном использовании ветровой и солнечной энергии.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. **Abd Ali, L. M.** A Novel Design of 7-Level Diode Clamped Inverter / **L. M. Abd Ali**, H. A. Mohammed, H. A. Wahhab // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2019, no. 14(11), pp. 3666-3673. 0,53 п.л./0,4 п.л. (**Scopus**)
2. **Abd Ali, L.M.** Modeling and simulation of tidal energy / **L. M. Abd Ali**, H. A. Mohammed, M.O.H. Anssari // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2019, no. 14(11), pp. 3698-3706. 0,6 п.л./0,45 п.л. (**Scopus**)
3. Kuvshinov, V. V. Storage System for Solar Plants / V. V. Kuvshinov, E. G. Kakushina, **L. M. Abd Ali**, V. V. Kuvshinova // Applied Solar Energy, 2019, Vol. 55, No 3, P. 153-158. 0,4 п.л./0,2 п.л. (**Scopus**)
4. Vologdin, S. V. Analysis of Various Energy Supply Scenarios of Crimea with Allowance for Operating Modes of Solar Power Planta / S. V. Vologdin, B. A. Yakimovich, V. V. Kuvshinov, **L. M. Abd Ali**, E. G. Kakushina, A. G. Al Barmani, F. M. Al-Rufae // Applied Solar Energy. – 2019. – Vol. 55. – No 4. – P. 229-234. 0,4 п.л./0,22 п.л. (**Scopus**)
5. Kuvshinov, V.V. Studies of the PV Array Characteristics with Changing Array Surface Irradiance / V.V. Kuvshinov, **L. M. Abd Ali**, E.G. Kakushina // Applied Solar Energy, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 223-228. 0,4 п.л./0,22 п.л. (**Scopus**)
6. Cheboxarov, V.V. Some Results of a Study of Wave Energy Converters at Sevastopol State University / V.V. Cheboxarov, B.A. Yakimovich, N.V. Lyamina, **L. M. Abd Ali**, I. G. Zhiganov // Applied Solar Energy, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 256-259. 0,27 п.л./0,12 п.л. (**Scopus**)

7. Cheboxarov, V.V. An Offshore Wind-Power-Based Water Desalination Complex as a Response to an Emergency in Water Supply to Northern Crimea / V.V. Cheboxarov, B.A. Yakimovich, **L. M. Abd Ali**, F. M. Al-Rufee // Applied Solar Energy, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 260-264. 0,33 п.л./0,18 п.л. (**Scopus**)

8. Guryev, V.V. 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 / V.V. Guryev, B.A. Yakimovich, **L. M. Abd Ali** // Applied Solar Energy, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 242-246. 0,33 п.л./0,18 п.л. (**Scopus**)

9. **Abd Ali, L. M.** a Study of Hybrid Wind–Solar Systems for the Iraq Energy Complex / **L. M. Abd Ali**, F. M. Al-Rufae, V. V. Kuvshinov, B.L. Krit, A. M. Al-Antaki, N.V. Morozov // Applied Solar Energy, 2020, vol. 56, no. 4, pp. 284–290. 0,47 п.л./0,42 п.л. (**Scopus**)

10. Kuznetsov, P. N. Investigation of the losses of photovoltaic solar systems during operation under partial shading / P. N. Kuznetsov, **L. M. Abd Ali**, V. V. Kuvshinov, H.A. Issa, H. J. Mohammed, A. G. Al-bairmani // Journal of Applied Engineering Science, 2020, Vol. 18, No. 3, pp. 313 - 320. 0,53 п.л./0,24 п.л. (**Scopus**)

11. **Абдали, Л. М.** Оптимизация аккумулирования энергии в гибридных системах ветроэнергетики и фотовольтаики / **Л. М. Абдали**, Ф. М. Аль-Руфай, Б. А. Якимович, В. В. Кувшинов // Вестник ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т. 23, No 2. С. 100–108. 0,6 п.л. /0,54 п.л.

12. **Абдали, Л. М.** Моделирование параметров управления интегрированной системой солнечной генерации и накопления энергии / **Л. М. Абдали**, В.В. Кувшинов, Э.А. Бекиров, Ф. М. Аль-Руфай // Строительство и техногенная безопасность, 2020, No18(70), С. 133-142. 0,67 п.л./0,6 п.л.

13. Аль-Руфай, Ф. М. Оценка потенциала ветроэнергетических ресурсов на юге Ирака / Ф. М. Аль-Руфай, **Л. М. Абдали**, В. В. Кувшинов, Б. А. Якимович // Вестник ИЖГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т. 23, No 3. С. 105–113. 0,6 п.л./0,24 п.л.

14. Kuvshinov, V.V. Experimental Studies on Receiving Surfaces of Flat Solar Collectors / V.V. Kuvshinov, **L. M. Abd Ali**, N.V. Morozova // Surf. Engin. Appl. Electrochemistry, 2021, vol. 57, no. 6, pp.715–720. 0,4 п.л./0,2 п.л. (**Scopus, WoS**)

15. Al-Rufae, F. Development of hybrid photo-wind power systems with a diesel generator to overcome energy shortages / F.M. Al-Rufae, **L. M. Abd Ali**, V.V. Kuvshinov// E3S Web of Conferences, "International scientific forum on computer and energy Sciences, WFCES 2021", 2021, P. 9. 0,6 п.л./0,3 п.л. (**Scopus**)

16. **Abd Ali, L. M.** Developing a thermal design for steam power plants by using concentrating solar power technologies for a clean environment / **L. M. Abd Ali**, Q. A. Ali

Klačková, I., Issa H. A., Yakimovich B. A. and Kuvshimov V. V. // Acta Montanistica Slovaca, 2021, Volume 26 (4), pp.773-783. 0,73 п.л./0,59 п.л. (**Scopus, WoS**)

17. **Абдали, Л. М.** Интеллектуальная система управления, используемая при работе ветроэлектрических установок / **Л. М. Абдали**, Ф. М. Аль-Руфай, Б. А. Якимович, В. В. Кувшинов // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2021. Т. 24, № 1. С. 102–112. 0,73 п.л./0,59 п.л.

18. Issa, H.A. Mathematical modeling and controller for PV system by using MPPT algorithm / H.A. Issa, H.J. Mohammed, **L.M. Abdali**, A.G. Al Bairmani // Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova, 2021, vol. 24, no. 1, pp. 96-101. 0,4 п.л./0,12 п.л.

19. **Абдали, Л.М.** Анализ и моделирование автономной фотоэлектрической системы с использованием среды matlab/Simulink / **Л.М. Абдали**, Х.А. Исса, К.А. Али, В.В. Кувшинов, Э.А. Бекиров // Строительство и техногенная безопасность. — 2021, № 21(73), с.97-105. 0,6 п.л./0,45 п.л.

20. **Абдали, Л. М.** Моделирование режимов работы фотоэлектрической системы / **Л. М. Абдали**, Х. Д. Мохаммед, Б. А. Якимович, В.В. Кувшинов, Н.В. Коровкин // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2021, Т. 24, № 3, С. 78-87. 0,67 п.л./0,53 п.л.

21. **Абдали, Л.М.** Техника искусственного интеллекта для производства энергии и автоматизация управления гибридной солнечно-ветро-дизельной энергетической системой / **Л.М. Абдали**, К.А. Али, В.В. Кувшинов, Э.А. Бекиров, Н.В. Коровкин // Строительство и техногенная безопасность. 2021, № 22(74), с.91-100. 0,67 п.л./0,53 п.л.

22. **Абдали, Л. М.** Исследование режимов работы комбинированных солнечно-ветровых установок для обеспечения уличного освещения / **Л. М. Абдали**, Х. А. Исса, М. Н. Аль-Малики, В.В. Кувшинов, Э.А. Бекиров // Строительство и техногенная безопасность, 2022, № 25(77), С.75-85. 0,73 п.л./0,59 п.л.

23. **Абдали, Л.М.** Использование гибридных ветро-солнечных систем для энергоснабжения города Аль-Наджаф в Республике Ирак / **Л.М. Абдали**, М. Н. К. Аль-Малики, К. А. Али, Б. А. Якимович, Н.В. Коровкин, В. В. Кувшинов // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2022, Т. 25, № 3, С. 82-91. 0,67 п.л./0,57 п.л.

24. Drwiega, A. Maximization the latent heat storage unit (LHSU) energy saving using simulated annealing algorithm/ A. Drwiega, Q. A. Ali, Dudek Marek, Maarroof N. R., **L. M. Abd Ali**, Yakimovich B. A. // MM Science Journal, 2023, pp. 6489-6494. 0,4 п.л./0,22 п.л. (**Scopus, WoS**).

Результаты работы также опубликованы в 18 статьях и тезисах российских и международных конференций.