

На правах рукописи

Ахмед Ибрагим

Ибрагим Ахмед Ибрагим Мохамед

**ПРИМЕНЕНИЕ ЭВОЛЮЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ НА
ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ**

Специальность 05.09.03 –
Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2020

Работа выполнена в Инженерной школе энергетики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: **Обухов Сергей Геннадьевич**
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Ганджа Тарас Викторович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры компьютерных систем в управлении и проектировании ФГБОУ ВО «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

Хамитов Рустам Нуриманович, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электрической техники ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет»

Защита состоится «27» января 2021 г. в 14.00 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.12 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г.Томск, ул. Усова, 7, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634034, г.Томск, ул.Белинского, 53а, и на сайте <http://dis.tpu.ru/>

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
ДС.ТПУ.12, к.т.н., доцент



М.В. Андреев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Важной задачей социально-экономического развития многих регионов России является обеспечение надежного и эффективного электроснабжения потребителей, территориально расположенных в районах, удаленных от центральной электрической сети. Одним из наиболее перспективных способов решения данной проблемы является применение гибридных систем электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии (Hybrid Renewable Energy Systems – HRES).

Для построения HRES с требуемым уровнем надежности и высокими технико-экономическими показателями необходимо обеспечить эффективное использование и преобразование первичной возобновляемой энергии. Стохастический характер первичных энергоносителей и нелинейность характеристик генерирующих источников определяют высокую сложность решения данной задачи, связанной с нахождением наилучшего варианта решения с различными критериями и с соблюдением различных ограничений. С математической точки зрения задачи подобного рода классифицируются как оптимизационные, и для их решения разработаны и применяются разнообразные методы математического программирования.

Для решения сложных оптимизационных задач в последнее время все чаще применяются математические алгоритмы, построенные по аналогии с естественными законами эволюции в природе. Такие алгоритмы получили название «эволюционных», и они активно используются для решения различных научных и инженерных задач. Наиболее востребованными областями практического применения эволюционных алгоритмов оптимизации в возобновляемой энергетике являются задачи разработки эффективных алгоритмов управления контроллерами максимальной мощности фотоэлектрических станций и оптимизации состава оборудования HRES.

Значительный вклад в разработку, совершенствование и внедрение технологий возобновляемой энергетики внесли известные российские ученые: П.П. Безруких, Н.И. Воропай, В.В. Елистратов, О.С. Поппель, Д.С. Стребков, В.Г. Николаев, В.И. Виссарионов, М.Г. Тягунов, В.М. Андреев, В.Е. Фортов, Б.В. Лукутин, В.З. Манусов, Е.В. Соломин, В.И. Велькин и другие. Однако, научные проблемы, связанные с разработкой и применением эволюционных алгоритмов оптимизации для повышения эффективности систем электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии, остаются во многом нерешенными.

Огромный потенциал и повсеместная доступность солнечной энергии определяют хорошие перспективы применения фотоэлектрических станций (ФЭС) в Российской Федерации, особенно в секторе микрогенерации, весомыми стимулами чему являются принятые меры государственной поддержки. Основными проблемами практического применения ФЭС являются относительно невысокая эффективность преобразования первичной солнечной энергии, и ярко-выраженная зависимость энергетических характеристик солнечных батарей (СБ) от внешних климатических условий.

Наиболее результативным способом повышения эффективности фотоэлектрических станций является применение режима экстремального регулирования мощности СБ при изменении внешних климатических условий. Практическая реализация данного режима ФЭС обеспечивается за счет применения контроллера поиска точки максимальной мощности (Maximum Power Point Tracking - MPPT), который обеспечивает автоматический поиск точки максимальной мощности (МРР) солнечных батарей в режиме реального времени.

Важнейшей характеристикой солнечных контроллеров является используемый ими метод отслеживания MPP. Именно метод отслеживания MPP во многом определяет эффективность самого контроллера и соответственно ФЭС. Практически все известные промышленные MPPT контроллеры используют методы поиска MPP на основе классических алгоритмов, которым присущ ряд недостатков. В последнее время в научных периодических изданиях ежегодно публикуется большое количество научных работ, посвященных разработке и исследованию новых эволюционных алгоритмов поиска MPP СБ, что подтверждает высокую актуальность данной проблемы для фотоэнергетики.

Проведенный обзор современных научных работ, посвященных оптимизации состава оборудования HRES показал, что основными проблемами решения данной задачи являются достоверное прогнозирование мощности, генерируемой установками возобновляемой энергетики, и выбор алгоритма решения оптимизационной задачи, обеспечивающего надежное определение экстремума целевой функции при заданных ограничениях с минимальными временными затратами. Применение разнообразных приемов и способов решения данной задачи свидетельствует о том, что на сегодняшний день научная проблема оптимизации состава оборудования HRES остается актуальной и не имеет законченного решения.

Объектом исследования являются изолированные гибридные системы электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии.

Предметом исследования являются алгоритмы поиска точки максимальной мощности солнечных батарей и оптимизации состава оборудования гибридных систем электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии.

Цель диссертационной работы – повышение эффективности гибридных систем электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии путем применения эволюционных алгоритмов оптимизации.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие **задачи**:

1. Выполнить сравнительный анализ способов повышения эффективности фотоэлектрических станций и методов отслеживания точки максимальной мощности солнечных батарей.
2. Разработать имитационную модель автономной фотоэлектрической станции, обеспечивающую моделирование ее динамических режимов и разработку эффективных алгоритмов управления.
3. Выполнить моделирование и провести анализ статических и динамических режимов преобразователя напряжения и контроллера максимальной мощности фотоэлектрической станции в условиях равномерного освещения и частичного затенения солнечных батарей.
4. Разработать методику выбора параметров основных компонентов автономной фотоэлектрической станции: преобразователя напряжения и контроллера поиска точки максимальной мощности, обеспечивающих максимально эффективное преобразование и использование солнечной энергии.
5. Определить оптимальные параметры эволюционных алгоритмов управления для цифровых контроллеров максимальной мощности фотоэлектрических станций.
6. Разработать методику оптимизации состава основного генерирующего оборудования гибридных систем электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии.

Методы исследований. Для решения поставленных задач использовались основные положения теоретических основ электротехники и силовой электроники, методы анализа линейных и нелинейных электрических цепей, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем. В качестве основного инструмента исследований использовался математический пакет Matlab/Simulink.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана методика определения параметров преобразователя напряжения и контроллера поиска точки максимальной мощности фотоэлектрических станций, основанная на анализе энергетических характеристик солнечных батарей, обеспечивающая максимальное эффективное использование доступной солнечной энергии.
2. Получены оптимальные параметры алгоритма роя частиц для применения в контроллерах максимальной мощности фотоэлектрических станций, обеспечивающие надежное и точное определение точки максимальной мощности солнечных батарей с учетом топологии построения электростанции.
3. Разработана методика и программное приложение для оптимизации состава оборудования гибридных систем электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии, построенная на алгоритме роя частиц, отличающаяся применением оригинальных прогнозных моделей солнечного излучения и скоростей ветра, обеспечивающих повышение точности и возможности применения в любой географической точке России.

Практическую значимость работы составляют разработанные методики и инструменты решения задач расчета и выбора параметров основных компонентов фотоэлектрической станции: преобразователя напряжения и контроллера поиска точки максимальной мощности, обеспечивающие максимально эффективное использование солнечной энергии. Получены оптимальные параметры алгоритма роя частиц, обеспечивающие его практическое применение в контроллерах максимальной мощности фотоэлектрических станций с различной топологией построения. Разработанная методика и программное приложение обеспечивают оптимальный выбор состава генерирующего оборудования гибридных систем электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии произвольной конфигурации.

Результаты диссертационной работы использовались на предприятии ООО «ВДМ-техника» при разработке, проектировании и изготовлении испытательного стенда-полигона гибридной системы электроснабжения на основе установок возобновляемой энергетики суммарной установленной мощностью 30 кВт.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика выбора параметров преобразователя напряжения и контроллера поиска точки максимальной мощности фотоэлектрических станций, основанная на анализе энергетических характеристик солнечных батарей.
2. Алгоритм роя частиц с оптимизированными параметрами для применения в контроллерах максимальной мощности фотоэлектрических станций с учетом топологии построения электростанции.
3. Методика и программное приложение для оптимизации состава оборудования гибридных систем электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии, построенная на эволюционном алгоритме роя частиц.

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Достоверность полученных результатов определяется корректным использованием теоретически обоснованных методов исследований, подтверждена сопоставлением с результатами других аналогичных исследований, успешной апробацией при проектировании и изготовлении испытательного стенда-полигона гибридной системы электроснабжения.

Апробация работы и публикации. Основные положения и результаты научно-квалификационной работы докладывались и обсуждались: Международная научная конференция «The 1st IEEE 2019 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), (IEEE REEPE 2019). Москва, Россия 14-15 Марта 2019 г.; Международная научная конференция «Энерго-ресурсоэффективность в интересах устойчивого развития». Томск, Россия 12-16 ноября 2018г.; Международный молодежный форум «Интеллектуальные энергосистемы». Томск, Россия 9-13 октября 2017 г.; Международная конференция «Прикладная физика, информационные технологии и инжиниринг» - «International conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering» (APITECH-2019). г. Красноярск, 25-27 сентября 2019 г.; The III international conference on knowledge engineering and applications (ISKEA 2018) Москва, Россия 25-27 июня 2018 г.

Личный вклад автора. Основные научные положения, результаты и выводы диссертационной работы получены автором лично. Анализ полученных результатов выполнен автором совместно с научным руководителем.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, среди которых 3 - в журналах из перечня ВАК; 9 - в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science, получены 3 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа содержит 199 страниц, в том числе 67 рисунков, 18 таблиц, список цитируемой литературы из 131 наименования, состоит из введения, 5-и глав, заключения и 2-х приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определены объект и предмет исследования, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе выполнен обзор и сравнительный анализ методов отслеживания точки максимальной мощности СБ. Все известные методы поиска MPP СБ можно разделить на две большие группы: классические и эволюционные.

Достоинствами классических методов являются простота реализации и высокая эффективность при равномерном солнечном освещении. Однако, в реальных условиях эксплуатации СБ часто работают в условиях частичного затенения, вызванных налетевшим облаком, тенью от деревьев и близлежащих зданий, загрязнением поверхности и т.п. Возможные варианты неравномерного освещения СБ и расчетные вольт-ваттные характеристики (VBX) представлены на рисунке 1. Из рис.1 видно, что в условиях частичного затенения VBX СБ искажается и приобретает сложную форму с несколькими локальными экстремумами, что значительно усложняет задачу отслеживания глобальной точки максимальной мощности.

Стандартные методы поиска точки максимальной мощности, которые применяются в контроллерах фотоэлектрических станций, не обеспечивают надежного отслеживания глобального экстремума VBX СБ, что приводит к увеличению потерь и снижению производительности электростанции. Потери мощности ФЭС из-за частичного затенения

и неточного отслеживания MPP могут составлять до 70% от общей вырабатываемой мощности. Следовательно, надежное и точное отслеживание MPP при частичном затенении СБ является необходимым условием обеспечения высокой энергетической эффективности ФЭС.

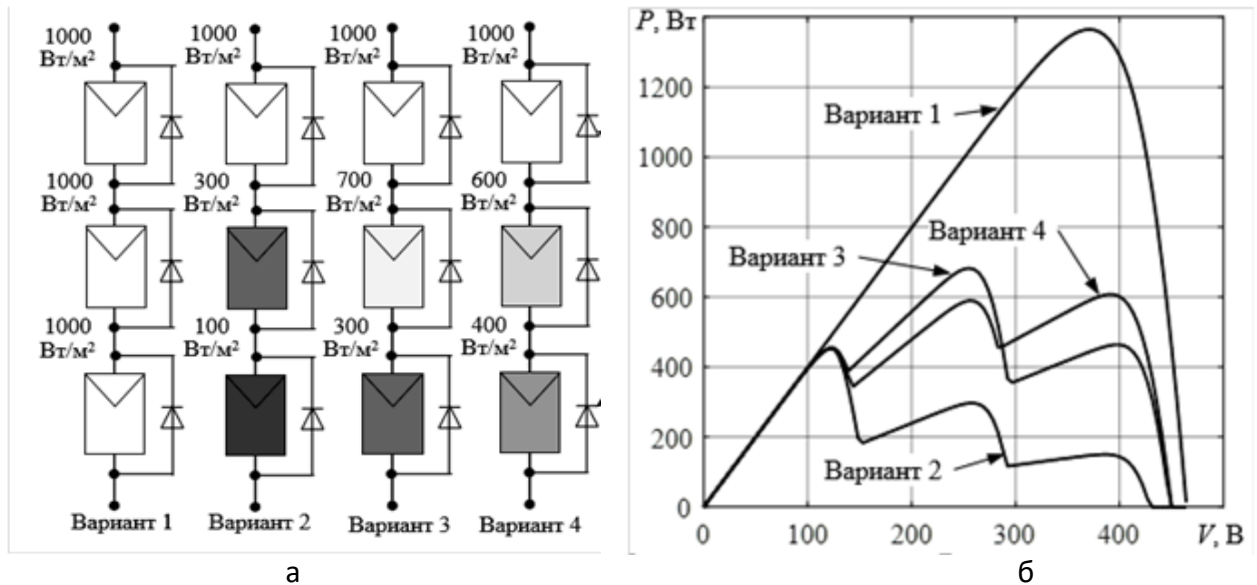


Рис. 1. а – возможные варианты неравномерного освещения солнечной батареи; б – вольт-ваттные характеристики СБ в условиях частичного затенения

Проведенный обзор и сравнительный анализ методов отслеживания MPP СБ показал, что наиболее перспективными для применения в MPPT-контроллерах ФЭС являются эволюционные алгоритмы роя частиц (PSO) и поиска кукушки (CS), достоинства которых являются простота, универсальность и высокое быстродействие.

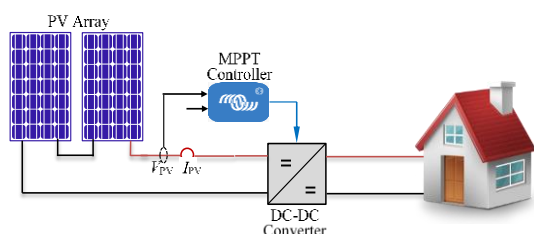
Выполненный анализ научных работ, посвященных исследованиям контроллеров MPPT ФЭС, построенных на базе алгоритма PSO, показал, что многие исследователи производят выбор основных параметров PSO методом проб и ошибок без учета топологии и параметров преобразователя напряжения и конфигурации СБ. При этом полученные авторами рекомендации по выбору параметров PSO зачастую имеют противоречивый характер. Необоснованный выбор параметров PSO и CS приводит к увеличению времени и уменьшению точности отслеживания MPP, и как следствие к снижению общей эффективности ФЭС. Также следует отметить, что в большей части работ, посвященных исследованиям PSO и CS, рассматриваются режимы работы СБ, подключенной к повышающему преобразователю с резистивной нагрузкой. Соответственно, полученные результаты исследований не могут быть использованы при проектировании автономных ФЭС малой мощности, схемы которых преимущественно строятся на базе преобразователей понижающего типа, работающих на аккумуляторную батарею (АБ).

Вторая глава посвящена разработке имитационной математической модели ФЭС, обеспечивающей моделирование ее динамических режимов и разработку эффективных алгоритмов управления.

Для достижения необходимой полноты проводимых исследований выделены четыре основных варианта базовой архитектуры построения ФЭС, используемых на практике, рис. 2. В простейшей конфигурации (рис. 2а) в состав ФЭС входят только СБ (PV array) и преобразователь постоянного напряжения (DC-DC converter), работающий под

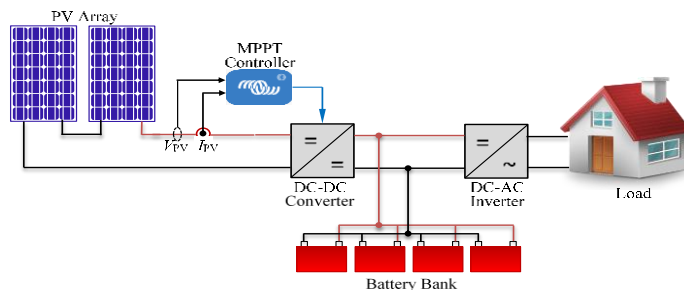
управлением MPPT-контроллера. В зависимости от назначения на практике используются два основных варианта построения автономных ФЭС с накопителями энергии: энергетические системы с единственным генерирующим источником (рис.2б) и гибридные энергетические комплексы, в составе которых кроме ФЭС в качестве источников генерации используются и другие установки, например, ветроэнергетические (Wind Turbine), рис. 2в. Для построения сетевых ФЭС используют двухступенчатую схему преобразования электрической энергии, генерируемой СБ, рис. 2г.

Схема 1



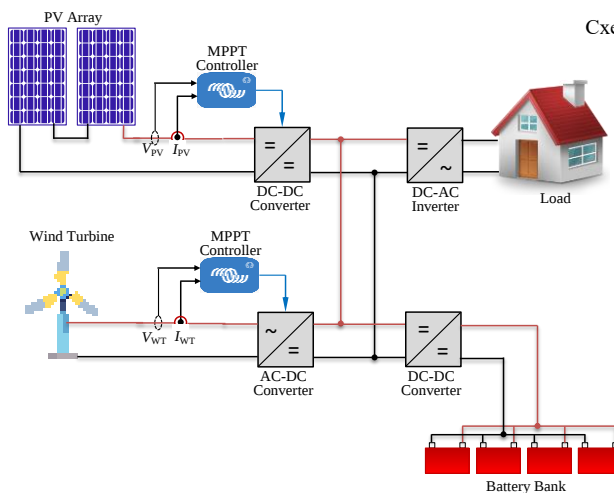
а

Схема 2



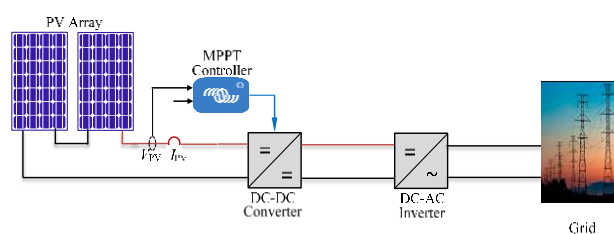
б

Схема 3



в

Схема 4



г

Рис.2 Структурные схемы построения фотоэлектрических станций
а – автономная без накопителя энергии; б – автономная с накопителем энергии;
в – гибридная электростанция с ФЭС; г – сетевая фотоэлектрическая станция

На рис. 3 представлена обобщенная функциональная схема ФЭС, построенная на основе сравнительного анализа ее возможных структурных схем. Представление ФЭС в виде 4 функциональных блоков, или подсистем, обосновано и удобно тем, что именно параметры данных компонентов определяют свойства и характеристики всей исследуемой технической системы. Разработка математических моделей данных компонентов с необходимыми входными и выходными переменными, обеспечивающими связь с другими компонентами ФЭС, обеспечивает построение полной имитационной модели ФЭС. При этом обеспечивается возможность проведения исследований режимов работы ФЭС произвольной архитектуры, с различным составом и типом компонентов, что и требуют задачи исследований.

Для построения математической модели СБ использовались известные и хорошо проработанные методы математического моделирования, построенные на основе эквивалентных электрических схем замещения солнечного элемента. Математические

модели преобразователей напряжения построены в соответствии с их принципиальными электрическими схемами, реализованными в среде Matlab/Simulink. При построении имитационной модели ФЭС нагрузка преобразователя моделировалась в виде отдельного функционального блока (рис. 4), что позволяет легко изменять конфигурацию исследуемой системы. Для моделирования АБ использовался стандартный блок Battery библиотеки Simulink, построенный на обобщенном соотношении Шеферда.



Рис.3. Обобщенная функциональная схема фотоэлектрической станции для построения математической модели

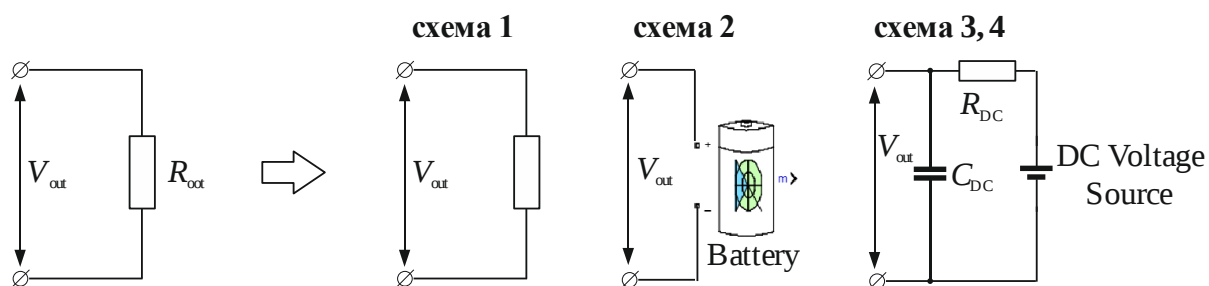


Рис. 4. Функциональные блоки нагрузки преобразователя напряжения имитационной модели ФЭС

Для проверки имитационных моделей преобразователей напряжения и АБ в части адекватного отображения их динамических характеристик были построены тестовые поверочные модели на основе непрерывных линеаризованных моделей. Упрощенная эквивалентная непрерывная линеаризованная модель понижающего преобразователя, работающего на АБ, представлена в виде схемы, изображенной на рис.5а. В упрощенной модели АБ представлена в виде безинерционного звена, состоящего из последовательно соединенных источника напряжения с величиной $V_{ВВ}$, равному номинальному напряжению АБ, и активного сопротивления $r_{ВВ}$, равным ее эквивалентному внутреннему сопротивлению. Результаты имитационного моделирования переходного процесса изменения выходной мощности DC-преобразователя, вызванные изменением величины его рабочего цикла, для трех различных значений r_L представлены на рисунке 5б.

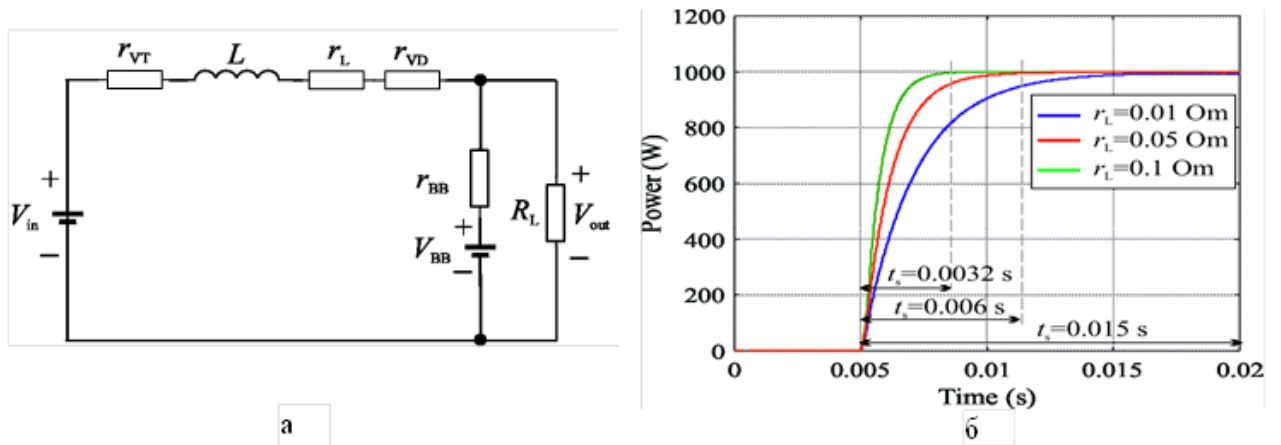


Рис. 5. а -упрощенная непрерывная линейризованная модель понижающего преобразователя, работающего на АБ; б - результаты моделирования переходного процесса изменения выходной мощности понижающего преобразователя при работе на АБ

Программный код алгоритмов МРРТ контроллеров реализован в m-файлах, что позволяет легко и просто вносить в код алгоритмов необходимые изменения, позволяющие исследовать их эффективность при различных значениях и законах изменения их параметров. Полученные результаты тестовых вычислительных экспериментов подтвердили возможность применения разработанных математических моделей компонентов для имитационного моделирования динамических режимов ФЭС.

Третья глава посвящена разработке методик выбора параметров эволюционных алгоритмов и преобразователей напряжения контроллеров максимальной мощности фотоэлектрических станций.

Применительно к ФЭС под МРРТ контроллером следует понимать комплектное устройство, содержащее в своем составе кроме непосредственно контроллера, еще и силовой преобразователь напряжения. Именно в такой комплектации МРРТ контроллеры производятся и представлены на рынке, что значительно упрощает задачу их выбора и практического применения для конечного потребителя. Соответственно для построения эффективного МРРТ контроллера ФЭС необходимо на этапе проектирования решить задачу согласованного выбора параметров как DC-DC преобразователя, так и непосредственно контроллера.

Максимальный отбор мощности с СБ обеспечивается при равенстве эквивалентного выходного сопротивления СБ в МРР R_{MPP} и эквивалентного входного сопротивления преобразователя R_{in} . Величина R_{in} зависит от топологии преобразователя, его нагрузки R_{out} и величины коэффициента заполнения d (duty cycle). При поиске МРР контроллер изменяет величину d таким образом, чтобы выполнялось условие $R_{MPP} = R_{in}$.

Величина R_{MPP} зависит от внешних условий эксплуатации СБ, и может изменяться в достаточно широком диапазоне. Соответственно, первоочередной задачей проектирования DC-преобразователей ФЭС является определение рабочего диапазона изменения его входного напряжения и эквивалентного входного сопротивления, которые зависят от освещенности G и температуры T_{FM} фотоэлектрических модулей.

На рис. 6 показано семейство расчетных ВВХ СБ, состоящей из трех последовательно соединенных ФМ Kyocera Solar KD320GX-LPB, построенных по результатам имитационного моделирования. Характеристики построены при дискретно заданных значениях $G = 100, 400, 700, 1000 \text{ Вт/м}^2$ и $T_{FM} = -25, 0, 25, 50 \text{ }^\circ\text{C}$. Выделенные на рисунке заштрихованные области определяют рабочий диапазон входных напряжений DC-преобразователя и его номинальную мощность.

Анализ ВВХ СБ (рис. 6) показывает, что для проектирования преобразователя ФЭС достаточно определить значения тока и напряжения в МРР для четырех узловых точек СБ при различных сочетаниях G и T_{FM} . Характеристики узловых точек СБ и соответствующие им показатели режима приведены в таблице 1.

Узловые точки СБ можно определить по результатам моделирования ВВХ с использованием динамической модели СБ, но для этого необходимо использовать численные методы вычислений, а соответственно и специализированное программное обеспечение, что осложняет возможность практического применения.

Однако, задачу определения рабочих диапазонов изменения входных напряжений и эквивалентного сопротивления ДС преобразователя можно значительно упростить, решив ее аналитическим путем, используя данные технической спецификации ФМ, и приняв допущения, что при изменении внешних климатических условий величина напряжения в МРР $V_{\text{МРР}}$ изменяется пропорционально напряжению холостого хода, а ток в МРР $I_{\text{МРР}}$ изменяется пропорционально фототоку.

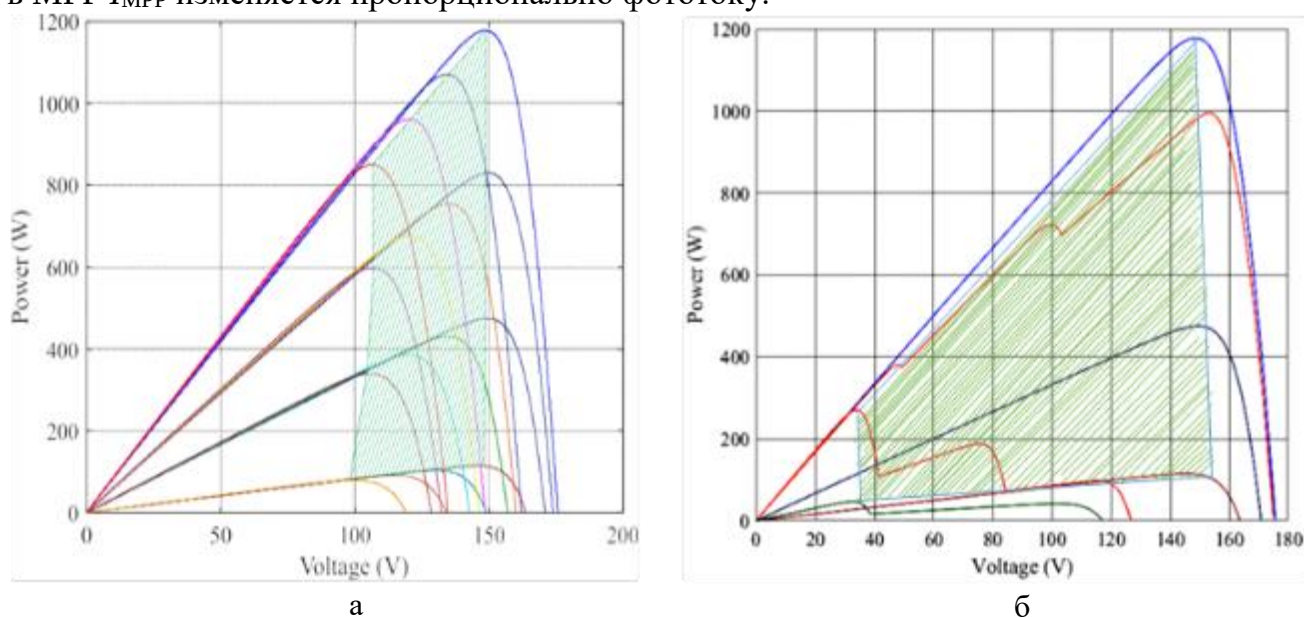


Рис.6. Вольт-ваттные характеристики солнечной батареи:
а) при равномерном освещении; б) при частичном затенении

Таблица 1 – Узловые точки солнечной батареи фотоэлектрической станции

Солнечная радиация G	Температура поверхности T_{FM}	Показатели	Режим
min	min	$R_{\text{МРР(max)}}, I_{\text{МРР(min)}}$	режим максимального сопротивления/
min	max	$P_{\text{МРР(min)}}, V_{\text{МРР(min)}}$	режим минимальной мощности
max	min	$P_{\text{МРР(max)}}, V_{\text{МРР(max)}}$	режим максимальной мощности
max	max	$R_{\text{МРР(min)}}, I_{\text{МРР(max)}}$	режим минимального сопротивления

Тогда для определения $V_{\text{МРР}}$ и $I_{\text{МРР}}$ при произвольных значениях G и T_{FM} можно использовать следующие уравнения:

$$I_{\text{МРР}} = \left[I_{\text{МРР_STC}} + k_I \cdot (T_{\text{FM}} - T_{\text{STC}}) \right] \cdot N_{\text{FMp}} \cdot \frac{G}{G_{\text{STC}}}, \quad (1)$$

$$V_{\text{МРР}} = \left[V_{\text{МРР_STC}} + k_V \cdot (T_{\text{FM}} - T_{\text{STC}}) \right] \cdot N_{\text{FMs}} - \left[(I_{\text{МРР_STC}} - I_{\text{МРР}}) \cdot R_s \right] \cdot \frac{N_{\text{FMs}}}{N_{\text{FMp}}}, \quad (2)$$

где V_{MPP_STC} и I_{MPP_STC} – напряжение и ток в MPP при стандартных условиях тестирования ($G_{STC}=1000 \text{ Вт/м}^2$, $T_{STC}=25 \text{ °C}$); N_{FMs} и N_{FMp} – число последовательно и параллельно соединенных ФМ в СБ, соответственно; R_S – последовательное сопротивление ФМ.

$$R_S = \frac{\frac{N_S \cdot A \cdot k \cdot T_{STC}}{q} \cdot \ln \left(1 - \frac{I_{MPP_STC}}{I_{SC_STC}} \right) + V_{OC_STC} - V_{MPP_STC}}{I_{MPP_STC}}, \quad (3)$$

где N_S – число последовательных солнечных элементов в ФМ.

Для определения параметров узловых точек СБ с учетом условий частичного затенения используются те же уравнения (1)-(3), в которых следует принять $N_{FMs}=1$.

Рассчитанные значения энергетических характеристик узловых точек СБ позволяют произвести обоснованный выбор параметров ДС преобразователя с учетом его топологии и характера нагрузки.

Для ФЭС на основе понижающего преобразователя, построенной по схеме 1 (рис.2), величина эквивалентной электрической нагрузки однозначно определяется выражением:

$$R_{out} = R_{load} \quad (4)$$

Для идеального преобразователя со стабилизированным выходным напряжением (схемы 2, 3) величина эквивалентного выходного сопротивления определяется по формулам:

$$R_{out(min)} = \frac{V_{out}^2}{P_{MPP(max)}}; \quad R_{out(max)} = \frac{V_{out}^2}{P_{MPP(min)}}, \quad (5)$$

где $P_{MPP(max)}$, $P_{MPP(min)}$ – значения максимальной и минимальной мощности, генерируемой СБ, определенные по ее узловым точкам.

Если пренебречь потерями в понижающем ДС-преобразователе из условия равенства его входной и выходной мощности, а также того, что в точке максимальной мощности $R_{MPP}=R_{in}$, из уравнения (5) выводится важное практическое соотношение:

$$\frac{V_{MPP}^2}{R_{MPP}} = \frac{V_{out}^2}{R_{out}} = \frac{(V_{MPP} \cdot d)^2}{R_{out}} \Rightarrow d = \sqrt{\frac{R_{out}}{R_{MPP}}} \quad (6)$$

Так как величина d не может быть больше 1, из (6) следует, что для обеспечения работы СБ в MPP во всех возможных эксплуатационных режимах, величина выходного сопротивления понижающего преобразователя должна быть меньше минимального эквивалентного сопротивления СБ в MPP:

$$R_{out} < R_{MPP(min)} \quad (7)$$

При проектировании преобразователя для ФЭС, построенных по схемам 2 и 3 (рис. 2), данное условие трансформируется в выбор рациональной величины номинального выходного напряжения преобразователя по условию:

$$V_{out} < V_{MPP(min)} \quad (8)$$

Импульсные преобразователи напряжения относятся к нелинейным дискретным системам автоматического регулирования, для определения динамических характеристик которых широкое распространение получили методы анализа на основе приближенных усредненных моделей преобразовательных устройств. Однако, при применении более перспективных цифровых контроллеров в проведении анализа частотных характеристик преобразователя нет необходимости. Основным техническим параметром цифровых контроллеров является тактовая частота f_d изменения рабочего цикла d преобразователя, выбор численного значения которой должен производиться из условия устойчивой

работы преобразователя. Выполнение данного условия будет обеспечено, если за время выборки $t_s = 1/f_d$ будет заканчиваться переходный процесс в преобразователе, вызванный изменением управляющего воздействия или внешних условий.

Постоянную времени понижающего DC-DC преобразователя τ приближенно можно найти из уравнения:

$$\tau = \frac{L}{R_{out}} \quad (9)$$

С учетом того, что длительность любого переходного процесса составляет до $5 \cdot \tau$, для определения оптимальной величины t_s рекомендуется использовать выражение:

$$t_s \geq 5 \cdot \tau \quad (10)$$

Выбор значения t_s по условию (10) обеспечит максимальное быстродействие MPPT-контроллера, и в то же время устойчивую работу преобразователя в MPP.

Предлагаемая методика была тщательно протестирована на имитационной модели ФЭС и показала хорошие результаты. Все MPPT контроллеры с параметрами, выбранными по предлагаемой методике, обеспечивали максимальный режим отбора мощности во всех моделируемых экспериментах при максимальном быстродействии. Для удобства практического применения методика реализована в виде прикладной программы, на которую получено свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Одной из задач, которая решалась в данной работе, является задача определения оптимальных параметров алгоритма роя частиц (PSO) для применения в MPPT контроллерах фотоэлектрических станций.

С использованием обобщенной формы записи алгоритм PSO можно описать следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} v_i^{k+1} &= v_i^k \cdot w + c_1 \cdot r_1 \cdot [Ppbest_i - x_i^k] + c_2 \cdot r_2 \cdot [Pgbest - x_i^k], \\ x_i^{k+1} &= x_i^k + v_i^k; \quad i = 1, 2, \dots, N; \quad k = 1, 2, \dots, k_{max} \end{aligned} \quad (11)$$

где c_1, c_2 – константы ускорения; r_1, r_2 – случайные функции в диапазоне $[0,1]$; i – порядковый номер частицы; k – значение текущей итерации; N – число частиц роя; k_{max} – максимальное число итераций.

При применении алгоритма PSO в MPPT контроллерах координатой частицы x_i^k является текущее значение коэффициента заполнения d транзисторного ключа, скоростью частицы v_i^k величина изменения d за время выборки $t_s - \Delta d$, целевой функцией является выходная электрическая мощность СБ – P_{PV} .

Основные параметры PSO (w, c_1, c_2, N, k_{max}) оказывают непосредственное влияние на его характеристики, и для достижения максимальной эффективности алгоритма необходимо найти лучшую комбинацию параметров. Важными параметрами PSO являются число частиц N и максимальное количество итераций k_{max} . Большое число N обеспечивает тщательное сканирование области поиска, но это приводит к увеличению времени выполнения одной итерации алгоритма, а соответственно и к увеличению общего времени поиска MPP. Основная сложность в выборе N заключается в том, что оптимальное значение N зависит не только от параметров самого PSO (w, c_1, c_2), но и от формы кривой мощности СБ, которая в свою очередь определяется ее конфигурацией и внешними факторами, имеющими стохастическую природу.

В большинстве научных работ, посвященных исследованию PSO, число N и k_{max} выбирают совместно с параметрами алгоритма для одной конкретной конфигурации СБ,

что ограничивает практическую область применения полученных результатов. В данной работе поставлена задача определения зависимости между числом частиц и эффективностью PSO с учетом конфигурации СБ. Для решения поставленной задачи в качестве объекта исследований выбраны 3 конфигурации СБ, для которых были сформированы тестовые варианты освещенности со сложными формами ВВХ (рис. 7) и определены параметры режима в MPP.

Для каждого из 10 тестовых вариантов выполнено моделирование рабочих режимов ФЭС с MPPT контроллером на основе PSO с числом частиц N от 3 до 8. При выполнении вычислительных экспериментов рассматривались различные модифицированные версии алгоритма PSO с разнообразными значениями и законами изменения параметров (w , c_1 , c_2).

Сравнительная оценка эффективности рассматриваемых алгоритмов проводилась по 3 критериям: точность отслеживания MPP η , потери энергии при поиске MPP E_{MPP} , фактическое время поиска точки максимальной мощности t_{MPP} .

Анализ результатов моделирования показал, что при большом числе N значительно увеличиваются потери энергии и время отслеживания MPP, при этом точность отслеживания не улучшается. Кроме того, применение большого числа N не гарантирует определение глобального экстремума при сложной форме ВВХ СБ. Проведенный анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод, что лучшим решением для алгоритма PSO при его применении в MPPT контроллерах является число $N=4$. При $N=4$ обеспечиваются высокая скорость и хорошая точность отслеживания MPP, минимизируются потери энергии при сохранении достаточно высокой надежности определения глобального экстремума при сложных формах ВВХ.

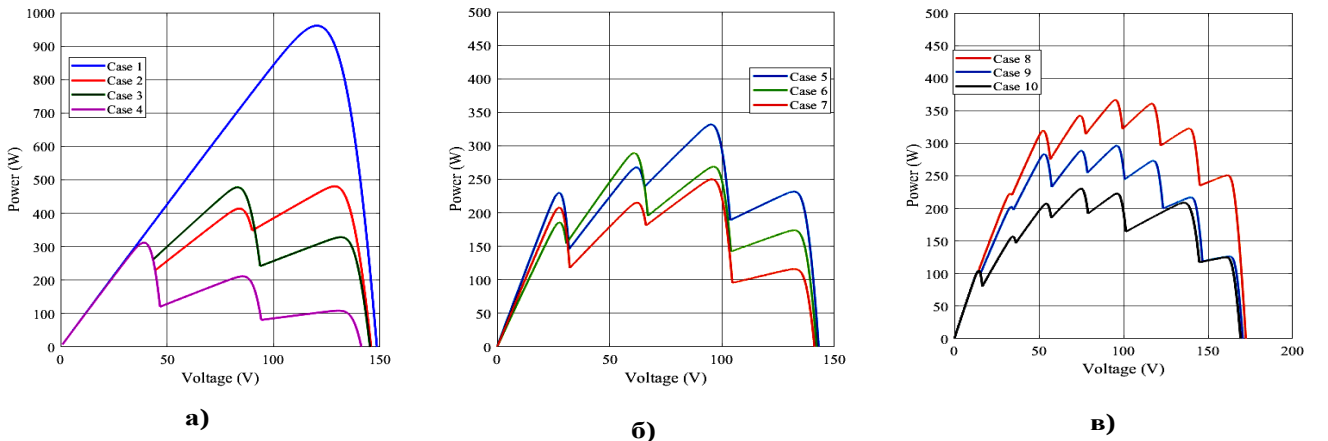


Рис. 7 Вольт-ваттные характеристики СБ с тестовыми вариантами освещенности: а) конфигурация PV1 на основе 3 ФМ Kyocera Solar KD320GX-LPB; б) конфигурация PV2 на основе 4 ФМ Kyocera Solar KD250GX-LPB; в) конфигурация PV3 на основе 8 ФМ Kyocera Solar KD130GX-LP

Из рассмотренных модификаций алгоритма PSO наилучшие результаты показала модифицированная версия с линейным законом изменения коэффициента инерции:

$$w^k = w_{\max} - \frac{k}{k_{\max}} \cdot (w_{\max} - w_{\min}), \quad (12)$$

в диапазоне от $w_{\max}=1.0$ до $w_{\min}=0.1$ и линейными разнонаправленными законами изменения коэффициентов ускорения:

$$c_1^k = c_{1\max} - \frac{k}{k_{\max}} \cdot (c_{1\max} - c_{1\min}), \quad c_2^k = c_{2\min} + \frac{k}{k_{\max}} \cdot (c_{2\max} - c_{2\min}) \quad (13)$$

Верхние и нижние границы изменения c_1 и c_2 устанавливаются в следующем диапазоне: $c_{1\min}=c_{2\min}=1.0$ и $c_{1\max}=c_{2\max}=2.0$.

Полученные результаты исследований показали, что алгоритм PSO с данными параметрами обеспечивает надежное и точное отслеживание MPP СБ с различными формами ВВХ и схемами построения ФЭС, что позволяет рекомендовать его для применения в МРРТ контроллерах ФЭС произвольной конфигурации.

Основной задачей исследований, представленных в **четвертой главе** работы, является оценка эффективности применения предложенных эволюционных алгоритмов и разработанной методики выбора параметров компонентов автономной фотоэлектрической станции: преобразователя напряжения и контроллера поиска точки максимальной мощности, обеспечивающих максимально эффективное преобразование и использование солнечной энергии.

Оценка эффективности выполнена по результатам имитационного моделирования режимов работы автономной ФЭС в условиях равномерного освещения и частичного затенения СБ на основе анализа статических и динамических характеристик преобразователя напряжения и контроллера максимальной мощности. В качестве инструмента исследований использовался математический пакет Matlab/Simulink, в среде которого на основе математических моделей компонентов была реализована полная имитационная модель ФЭС.

Для повышения достоверности полученных результатов и оценки эффективности преобразования энергии в имитационной модели ФЭС учтены не идеальности элементов преобразователя: активное сопротивление дросселя и эквивалентное внутреннее сопротивление конденсаторов, а также статические характеристики транзистора и диода: падение напряжение и сопротивление в проводящем состоянии. В работе представлены результаты сравнительной оценки с одним из самых эффективных и распространенных классических алгоритмов – алгоритмом приращения проводимости (IC).

На рис.8 приведены результаты моделирования динамических режимов ФЭС с МРРТ контроллером, построенным на базе алгоритма IC для схем 1 и 2 (результаты для схемы 3 и 4 здесь и далее не приводятся, так как они практически идентичны схеме 2), в условиях равномерного освещения.

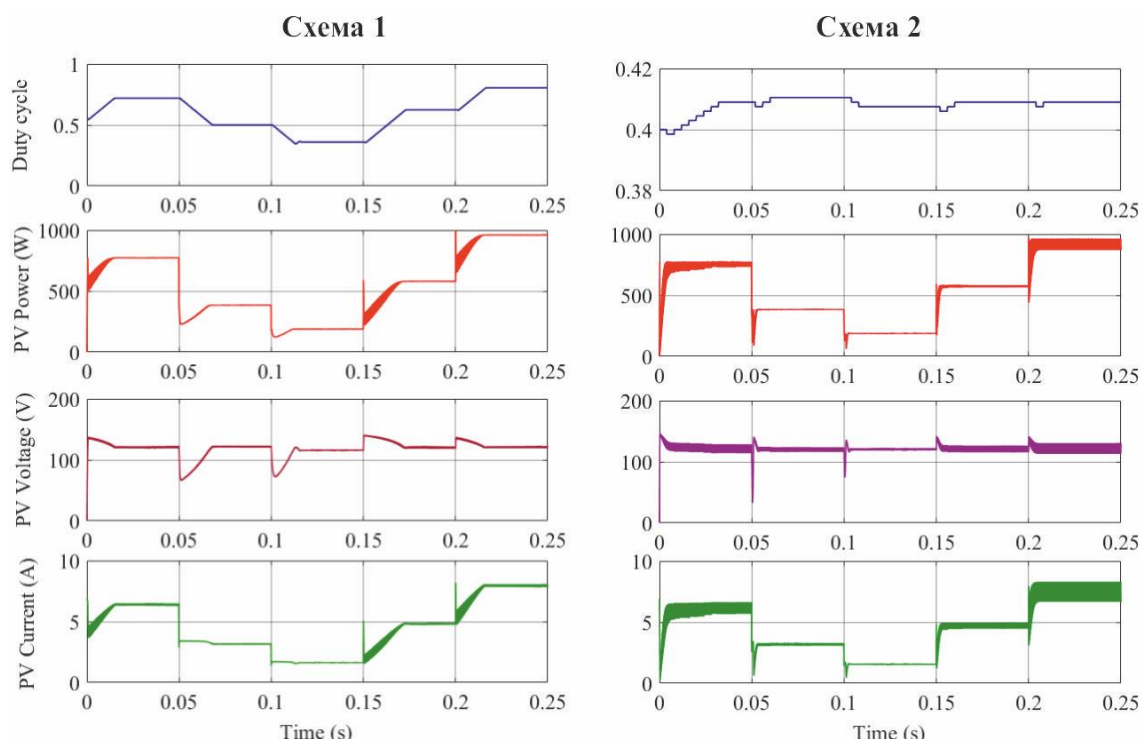


Рис.8. Результаты моделирования режимов ФЭС с МРРТ-контроллером на базе алгоритма IC

При проведении данного вычислительного эксперимента условия освещенности СБ изменяются через 0.05 с модельного времени и соответствуют следующим последовательным значениям солнечной радиации – тестам: $G=800; 400; 200; 600; 1000$ Вт/м². Температура поверхности ФМ принята неизменной и равной $T=25$ °С.

Результаты моделирования, представленные на рис. 8, доказывают, что DC преобразователь и МРРТ-контроллер с выбранными значениями параметров обеспечивают надежное и эффективное отслеживание МРР во всех 5 тестовых вариантах изменения освещенности. Точность отслеживания точки максимальной мощности в схеме 1 составляет не менее 99.6%, в схеме 2 не менее 98.2%, а коэффициент полезного действия DC преобразователя во всех рассмотренных режимах не опускался ниже 93.2 %. Рабочие диапазоны изменения энергетических характеристик основных элементов ФЭС (ток, напряжение, мощность) соответствуют расчетным значениям, полученным при их проектировании.

Интересная особенность динамических режимов автономной ФЭС состоит в следующем: несмотря на то, что схема 2 имеет гораздо большую инерционность чем схема 1, переходные процессы в ней, вызванные внезапным изменением освещенности СБ, заканчиваются намного быстрее (см. рис. 8). Объясняется это тем, что изменение величины солнечной радиации незначительно влияет на напряжение в МРР СБ, и в схемах со стабилизированным выходным напряжением преобразователя величина коэффициента заполнения d остается практически неизменной, что обеспечивает быстрое окончание переходного процесса.

Эволюционные алгоритмы сканируют весь рабочий диапазон изменения коэффициента заполнения d , что приводит к увеличению времени поиска МРР в схемах ФЭС со стабилизированным выходным напряжением преобразователя. Данную проблему можно частично устранить за счет выбора соответствующих параметров эволюционных алгоритмов в соответствии с величиной рабочего диапазона изменения d преобразователя.

На рис. 9 представлены результаты вычислительных экспериментов по сравнительной оценке эффективности MPPT контроллеров на основе эволюционного алгоритма PSO и классического алгоритма IC в условиях частичного затенения СБ. Результаты моделирования соответствуют схеме 2 (рис.2) и конфигурации PV1 (рис.7а).

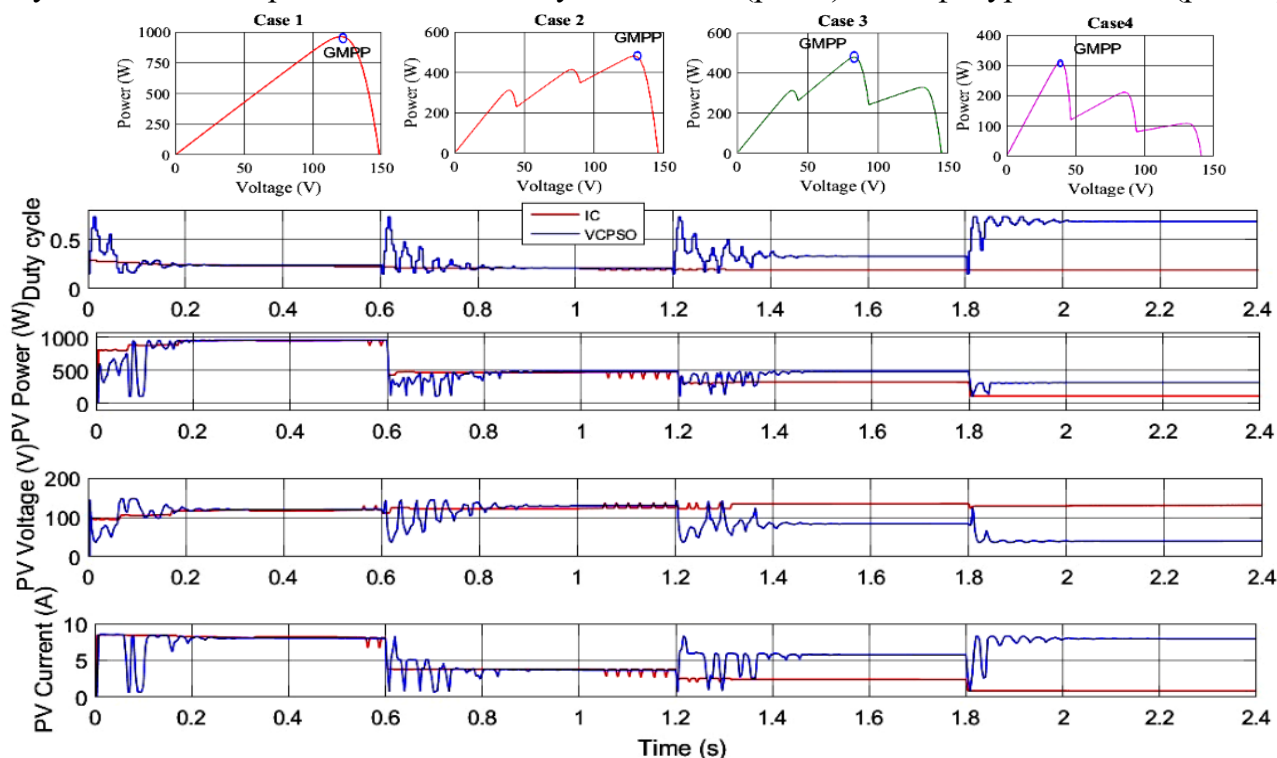


Рис. 9. Результаты моделирования режимов ФЭС с MPPT контроллерами на базе алгоритмов PSO и IC и при изменении условий освещения СБ, построенных на базе конфигураций PV1 для схемы 2

Анализ результатов, представленных на рис.9 показывает, что применение IC алгоритма, который широко используется в промышленных контроллерах фотоэлектрических станций, не обеспечивает надежного отслеживания глобального экстремума вольт-ваттной характеристики в условиях частичного затенения СБ, что приводит к увеличению потерь и снижению производительности электростанции. Алгоритм PSO с выбранными значениями параметров обеспечивает надежное и эффективное отслеживание точки максимальной мощности СБ как в условиях равномерного освещения, так и частичного затенения СБ, чем достигается повышение эффективности электростанции.

Результаты проведенных вычислительных экспериментов показали, что разработанная методика расчета и выбора параметров компонентов автономной ФЭС по узловым точкам СБ обеспечивает максимально эффективное преобразование и использование доступной солнечной энергии за счет высокой скорости и хорошей точности отслеживания точки максимальной мощности СБ в условиях равномерного освещения и частичного затенения солнечных батарей.

Пятая глава посвящена разработке методики оптимизации состава оборудования гибридных систем электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии. В результате проведенных исследований разработана методика оптимизации состава оборудования HRES, реализованная в виде программного приложения, рис. 10.

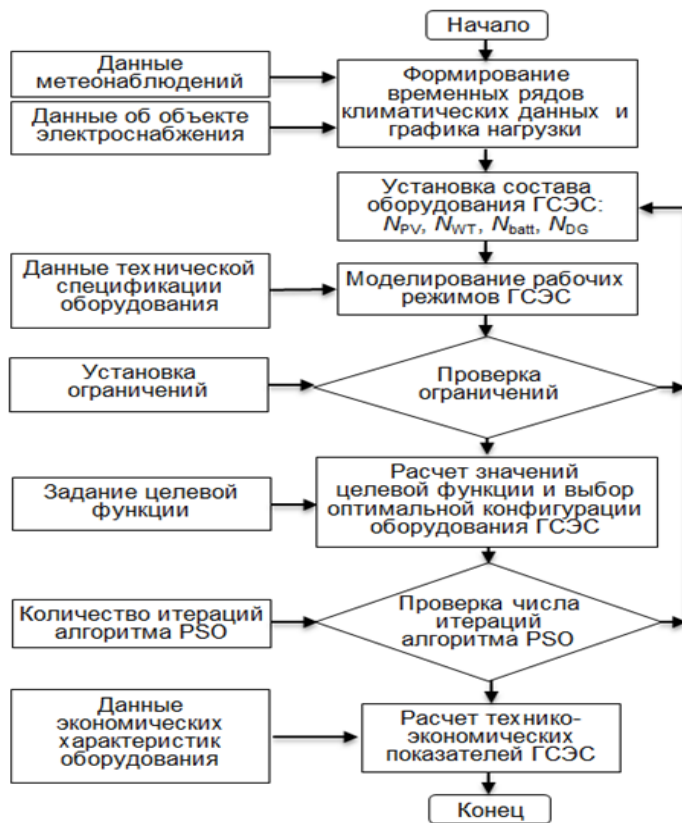


Рис. 10. Упрощенная блок-схема программного приложения для оптимизации состава оборудования гибридных систем

формировать временные ряды данных с произвольно заданными параметрами. В данной работе используются временные ряды продолжительностью в один год с дискретизацией в один час, которые преимущественно применяются для решения задач оптимизации HRES.

На втором этапе расчетов выполняется моделирование рабочих режимов HRES, в результате которого определяются технические показатели проектируемой электроэнергетической системы. Основным инструментом исследований второго этапа является имитационная модель HRES, реализованная в программном комплексе MatLab/Simulink. Исходными данными для выполнения данного этапа расчетов являются основные технические характеристики энергетического оборудования HRES, установленные по данным их технической спецификации.

Оптимизация состава оборудования HRES выполняется на заключительном третьем этапе расчетов. Для решения оптимизационной задачи используется специализированный программный модуль, реализованный в виде библиотеки программ-функций MatLab. Программный модуль построен на основе алгоритма PSO. Результаты сравнения алгоритма PSO с другими видами алгоритмов при решении задач оптимизации состава оборудования HRES доказывают его высокую производительность, а также надежное функционирование при использовании различных целевых функций и ограничений. Исходными данными для выполнения данного этапа расчетов являются экономические характеристики оборудования и заданные критерии оптимизации и ограничения.

Оптимизация состава оборудования HRES выполняется за три последовательных этапа. На первом этапе расчетов формируются временные ряды климатических данных (солнечной радиации, скорости ветра и температуры воздуха) и график электрических нагрузок потребителя электроэнергии. Временные климатические ряды формируются на основе географических координат размещения HRES и данных многолетних метеонаблюдений, для построения графика электрических нагрузок используется вероятностно-статистическая модель электрических нагрузок децентрализованного потребителя. Исходными данными для выполнения первого этапа программы являются данные метеорологических сайтов и базы данных Национального управления по авиации и исследованию космического пространства (NASA). В зависимости от требований к детализации расчетов программное приложение позволяет

Приложение апробировано на практическом примере выбора состава оборудования HRES, предназначенной для электроснабжения изолированного потребителя с максимальной мощностью нагрузки 10 кВт, территориально расположенного в районе г. Владивостока. Сформированные временные климатические ряды и годовой график нагрузки потребителя представлены на рис. 11.

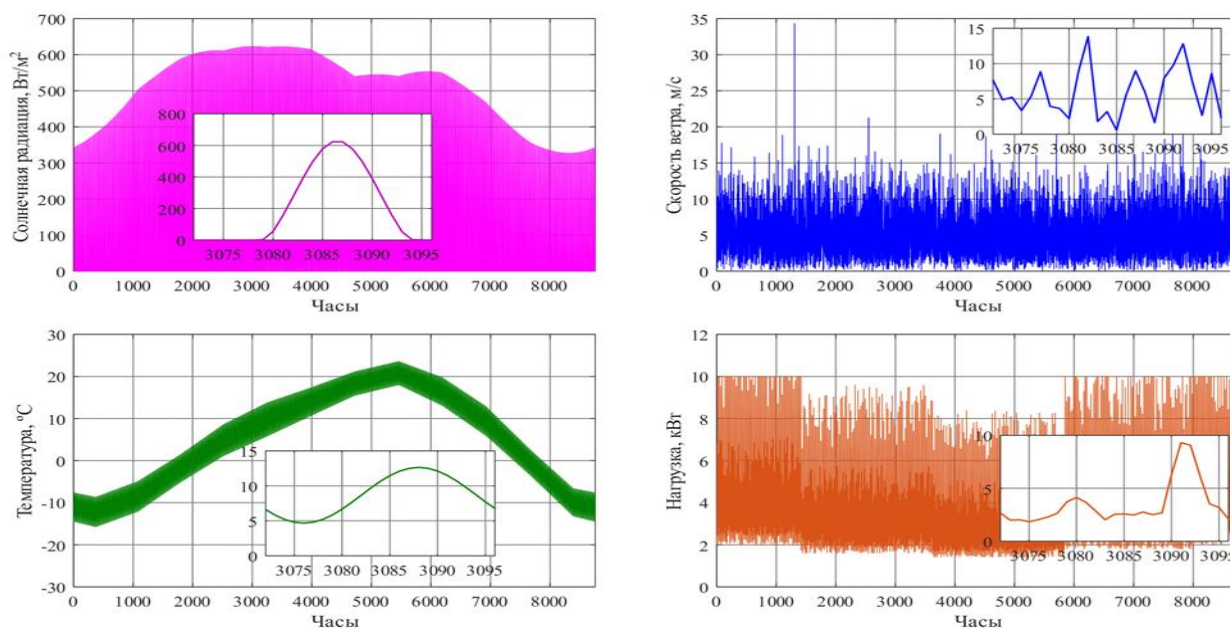


Рис. 11. Временные ряды климатических данных и график нагрузки потребителя

В качестве основного энергетического оборудования HRES использовались следующие виды компонентов: фотоэлектрические модули поликристаллического типа Kyocera Solar KD320GX-LPB, ветроэнергетическая установка AeolosH2KW, аккумуляторы НОРРЕСКЕ 8 OPzS 800, дизель-генераторная установка (ДГ) Perkins 403D-15G, автономные инверторы Victron Phoenix3000, суммарной мощностью 12 кВт. Технические характеристики компонентов приняты в соответствии с данными технической спецификации их производителей, экономические показатели определены по данным публикаций. Основные технико-экономические характеристики основного оборудования HRES представлены в табл. 2.

Приведенные в табл.2 экономические характеристики оборудования включают затраты на монтажные, пусконаладочные работы и соответствующие преобразователи для ФЭУ, ВЭУ и АБ. Процентная ставка в расчетах принята равной $i=7\%$, срок жизненного цикла проекта $T=20$ лет. Солнечная батарея установлена неподвижно под углом 43° к поверхности и ориентирована на Юг, расход дизельного топлива при номинальной нагрузке ДГ составляет 3,67 литра, стоимость топлива принята равной \$0,67/литр. Допустимая глубина разряда аккумуляторных батарей принята равной $DOD=70\%$, максимальная зарядная мощность $P_{ch,max} = 0,2 \cdot SOC_{max}$.

Искомými переменными оптимизационной задачи являются число единиц оборудования HRES: количество фотоэлектрических модулей N_{PV} , ветроэнергетических установок N_{WT} и аккумуляторов N_{BB} в аккумуляторной батарее. Критерием оптимизации является минимальная стоимость жизненного цикла $LCC=\min$. Задачи исследований состояли в определении оптимального состава оборудования HRES различных конфигураций. В табл. 3 представлены результаты решения задач оптимизации состава оборудования HRES с гарантированным источником питания в виде ДГ.

Таблица 2 – Техничко-экономические характеристики оборудования

Показатель	Оборудование				
	Kyocera Solar KD320GX- LPB	Aeolos H2KW	HOPPECKE 8OPzS 800	Perkins 403D- 15G	Victron Phoenix3000
Номинальная мощность (емкость)	320 Вт	2 кВт	1,6 кВт·ч	12 кВт	12 кВт
Капитальные затраты, долл.США	800	4200	360	10000	8600
Затраты на обслуживание, долл.США	8	170	3,6	0,33/час	0
Срок службы	20 лет	20 лет	5 лет	15000 час	10 лет

Таблица 3 – Оптимальный состав оборудования HRES

Конфигурация HRES	Количество единиц оборудования				LCC, долл. США
	N_{PV}	N_{WT}	N_{BB}	N_{DG}	
ДГ	0	0	0	1	20046
ДГ-ФЭУ-АБ	86	0	73	1	17044
ДГ-ВЭУ-АБ	0	14	40	1	16310
ДГ-ФЭУ-ВЭУ-АБ	39	8	38	1	14428

Результаты исследований показывают, что при принятых в данной работе технико-экономических характеристиках оборудования, минимальные общие затраты на энергетическую систему в течение всего ее срока службы соответствуют конфигурации с применением фотоэлектрических и ветроэнергетических установок. В сравнении с энергетической системой, построенной на базе одного ДГ, стоимость жизненного цикла такой системы уменьшается практически в 1,4 раза.

В результате проведенных исследований разработаны методика и программное приложение для оптимизации состава оборудования гибридных систем электроснабжения с ВИЭ. В составе разработанной программы используется оригинальная модель солнечной радиации на базе данных NASA, что позволяет ее использовать для прогнозирования основных характеристик солнечного излучения в любой географической точке России, в том числе и для территорий, по которым отсутствуют результаты регулярных актинометрических наблюдений. Для прогнозирования суточного хода скорости ветра используется функция обратного распределения Вейбулла, что обеспечивает повышение достоверности прогнозирования выработки электроэнергии ветроэнергетической установкой на суточных временных интервалах. В отличие от известных специализированных прикладных программ, применяемых для оптимизации состава оборудования HRES, предлагаемое программное приложение позволяет использовать для решения оптимизационной задачи различные критерии оптимизации и ограничения. Входящий в состав приложения модуль оптимизации на основе алгоритма роя частиц обеспечивает надежное и быстрое решение однокритериальных и многокритериальных задач оптимизации при заданных ограничениях.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Выполнен сравнительный анализ способов повышения эффективности фотоэлектрических станций и методов отслеживания точки максимальной

мощности солнечных батарей в условиях равномерного освещения и частичного затенения.

2. Разработана имитационная модель автономной фотоэлектрической станции, обеспечивающая моделирование ее динамических режимов и разработку эффективных алгоритмов управления контроллерами максимальной мощности солнечных батарей.
3. Предложен метод расчета и выбора параметров преобразователей напряжения фотоэлектрических станций, основанный на анализе энергетических характеристик солнечных батарей, обеспечивающий максимально эффективное использование и преобразование доступной солнечной энергии.
4. Предложен, теоретически обоснован и подтвержден результатами моделирования метод определения оптимальных значений времени выборки для цифровых MPPT контроллеров фотоэлектрических станций, обеспечивающий их максимальное быстродействие.
5. Определены оптимальные параметры алгоритма роя частиц для применения в MPPT контроллерах фотоэлектрических станций с учетом архитектуры построения электростанции и конфигурации солнечных батарей.
6. Выполнен сравнительный анализ эффективности применения контроллеров максимальной мощности на основе эволюционных и классических алгоритмов, результаты которого показали значительные преимущества эволюционных алгоритмов при отслеживании точки максимальной мощности: в условиях частичного затенения солнечных батарей эффективность эволюционных алгоритмов выше до 70%.
7. Разработана методика и программное приложение для оптимизации состава оборудования гибридных систем электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии, построенная на алгоритме роя частиц, обеспечивающая оптимальный выбор состава оборудования систем произвольных конфигураций при заданных критериях оптимизации и ограничениях.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Обухов С. Г., Ибрагим А. Анализ режимов и выбор параметров преобразователя напряжения и контроллера максимальной мощности автономной фотоэлектрической станции // Вестник Иркутского государственного технического университета. - 2020 - Т. 24 - №. 1(150). - С. 164-182.
2. Обухов С. Г., Плотников И. А., Ибрагим А., Масолов В. Г. Двухконтурный накопитель энергии для гибридных энергетических систем с возобновляемыми источниками энергии // Известия Томского политехнического университета. Geo Assets Engineering. - 2020 - Т. 331 - №. 1. - С. 64-76.
3. Обухов С. Г., Ибрагим А. Оптимизация состава оборудования гибридных энергетических систем с возобновляемыми источниками энергии // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. - 2020 - Т. 20 - №. 2.

Публикации в изданиях, входящих в базы Scopus и WoS:

4. Ibrahim A., Obukhov S. G, Aboelsaud R. Determination of Global Maximum Power Point Tracking of PV under Partial Shading Using Cuckoo Search Algorithm // Applied Solar Energy. - 2019 - Т. 55 - №. 6. - С. 367-375. doi: 10.3103/S0003701X19060045

5. Ibrahim A., Aboelsaud R., Obukhov S. G. Improved particles warm optimization for global maximum power point tracking of partially shaded PV array // *Electrical Engineering*. - 2019 - T. 101 - №. 2. - C. 443-455. doi: 10.1007/s00202-019-00794-w
6. Ibrahim A., Aboelsaud R., Obukhov S. G. Maximum power point tracking of partially shading PV system using cuckoo search algorithm // *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*. - 2019 - T. 10 - №. 2. - C. 1081-1089.
7. Obukhov S. G., Ibrahim A., Aboelsaud R. Optimal parameters selection of particle swarm optimization based global maximum power point tracking of partially shaded PV // *Journal of Physics: Conference Series*. - 2019 - T. 1399 - №. 2. - C. 1-7. doi: 10.1088/1742-6596/1399/2/022032
8. Ibrahim A., Aboelsaud R., Obukhov S. G. Application of Cuckoo Search Algorithm for Global Maximum Power Point Tracking of PV under Partial Shading // *1st IEEE 2019 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE 2019): Prodeedings, Moscow, March 14-15, 2019*. - Piscataway: IEEE, 2019 - C. 1-6.
9. Ibrahim A., Aboelsaud R., Obukhov S. G. Comprehensive Analysis of PSO and P&O for the Global Maximum Power Point Tracking of the PV under Partial Shading // *1st IEEE 2019 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE 2019): Prodeedings, Moscow, March 14-15, 2019*. - Piscataway: IEEE, 2019 - C. 1-6.
10. Obukhov S. G., Ibrahim A., Aboelsaud R. Maximum Power Point Tracking OF Partially Shading PV system Using Particle Swarm Optimization // *ACM International Conference Proceeding Series : 4th International Conference on Frontiers of Educational Technologies (ICFET2018)*, Moscow, June 25-27, 2018. - New York: ACM, 2018 - C. 161-165.
11. Obukhov S., Ibrahim A., Diab A. A. Z., Al-Sumaiti A. S., Aboelsaud R. Optimal performance of dynamic particle swarm optimization based maximum power trackers for stand-alone PV system under partial shading conditions // *IEEE Access*. – 2020. – T. 8. – C. 20770–20785. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2966430
12. Obukhov S. G., Ibrahim A., Tolba M. A., El-Rifay A. M. Power balance management of an autonomous hybrid energy system based on the dual-energy storage // *Energies*. - 2019 - T. 12 - №. 24. - C. 1-16. doi: 10.3390/en12244690

Объекты интеллектуальной собственности:

1. Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ. Определение точки максимальной мощности солнечной батареи алгоритмом роя частиц. // № 2018619320, дата государственной регистрации в реестре программ для ЭВМ 03-08-2018г.
2. Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ. Отслеживание точки максимальной мощности солнечной батареи при помощи алгоритма поиска cuckoo. // № 2018664032, дата государственной регистрации в реестре программ для ЭВМ 09-11-2018г.
3. Свидетельства о регистрации программы для ЭВМ. Выбор параметров преобразователя напряжения и контроллера максимальной мощности автономной фотоэлектрической станции. // № 2020611282, дата государственной регистрации в реестре программ для ЭВМ 28-02-2020г.